



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Ambientale – Indirizzo Materiali  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale e dei Materiali - DICAM  
ING-IND/22 - Scienza e tecnologia dei materiali

## ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA TENACITÀ A FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI

IL DOTTORE

**TOMMASO SCALICI**

IL COORDINATORE

**Prof. ORAZIO GIUFFRÈ**

IL TUTOR

**Prof. ANTONINO VALENZA**

CICLO XXVI  
Anno 2015



**Tesi di Dottorato:**

**Analisi e sviluppo di un setup sperimentale per la  
determinazione della tenacità a frattura a *MODO*  
*II* nei materiali compositi e ibridi**

**Tommaso Scalici\***

*Università degli Studi di Palermo*

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali*

\*Phone: +39 3294044483

\*Fax: 0039 091 7025020

\*E-mail: [tommaso.scalici01@unipa.it](mailto:tommaso.scalici01@unipa.it)

\*E-mail: [tommaso.scalici01@gmail.com](mailto:tommaso.scalici01@gmail.com)







## Prefazione

Questa tesi di Dottorato è presentata come adempimento dei requisiti per il completamento del corso di Dottorato Ricerca in Ingegneria Civile e Ambientale – Indirizzo: Materiali – Ciclo XXVI. Le attività sono state condotte principalmente presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale e dei Materiali (DICAM) dell'Università degli Studi di Palermo durante il periodo compreso tra Gennaio 2013 e Dicembre 2015. Il programma svolto è stato supervisionato dal Prof. Antonino Valenza, Ordinario presso l'Università degli Studi di Palermo.

Esprimo la mia più sincera riconoscenza al Prof. Antonino Valenza per la supervisione costruttiva del lavoro svolto e per il suo incoraggiamento. Desidero ringraziare tutto il team con cui ho lavorato e in particolare l'Ing. Vincenzo Fiore per il suo inestimabile e altamente qualificato aiuto. Per il suo preziosissimo apporto nelle fasi sperimentali, ringrazio il Prof. Giuseppe Pitarresi la cui precisione nell'eseguire le misurazioni è stata fortemente apprezzata.

Parte fondamentale del lavoro è stato sviluppato all'estero in collaborazione con la Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Oporto, Portogallo) sotto la supervisione del Prof. Pedro Ponce Camanho e del Ph.D. Giuseppe Catalanotti. Ringrazio, dunque, il Prof. P. P. Camanho per avermi dato la possibilità di visitare e lavorare presso le strutture dell'Università di Oporto e il Ph.D. Giuseppe Catalanotti per il pregiatissimo supporto scientifico.



ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA TENACITÀ A  
FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA TENACITÀ A  
FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



## Sommario

Il presente lavoro di Tesi si propone a compimento del percorso previsto dal Ciclo XXVI del corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile e Ambientale – Indirizzo Materiali – seguito durante il triennio Gennaio 2013- Dicembre 2015 presso l'Università degli Studi di Palermo.

L'elaborato si sviluppa in due principali sezioni. Dopo un'introduzione all'argomento affrontato, nella prima parte del lavoro, viene analizzato, sia sperimentalmente che numericamente, un setup tipicamente utilizzato nell'industria aeronautica per la caratterizzazione delle delaminazione a *MODO II* nei materiali compositi (*Transverse Crack Tensile test* – TCT-test).

A partire dai risultati ottenuti dalle analisi preliminari, considerate le problematiche riscontrate nella configurazione classica, viene proposta una geometria alternativa per lo studio del cedimento per delaminazione da taglio nei laminati compositi e nei materiali ibridi.

I dati ottenuti dalle campagne sperimentali sono corredati dalla presentazione delle tecniche di indagine utilizzate per la valutazione a campo intero delle deformazioni e delle tensioni (*Digital Image Correlation* – DIC – e *Thermoelastic Stress Analysis* – TSA –), nonché dalla descrizione dei modelli analitici e metodi numerici applicati.

I risultati ricavati dalle campagne sperimentali sono discussi e dimostrano che le modifiche apportate per ottenere la nuova configurazione proposta permettono di





eseguire prove di caratterizzazione della delaminazione a *MODO II* per i materiali compositi.

Tramite simulazione numerica e applicazione di un algoritmo di *orthotropic rescaling*, infine, le conclusioni vengono generalizzate tenendo conto della variabilità delle condizioni di ortotropia dei materiali.



## Indice

<b>Prefazione .....</b>	<b>i</b>
<b>Sommario .....</b>	<b>iv</b>
<b>Indice.....</b>	<b>vi</b>
<b>Indice delle Figure .....</b>	<b>ix</b>
<b>Simboli .....</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introduzione.....</b>	<b>1</b>
1.1 Premessa e motivazioni.....	1
1.2 Cedimento dei compositi e Damage Tolerance .....	3
1.3 Overivew della tesi .....	7
<b>2 Meccanica della Frattura e metodologie di calcolo .....</b>	<b>9</b>
2.1 Criterio energetico per la valutazione delle proprietà di tenacità a frattura .....	10
2.2 Criterio locale e stato tensionale all’apice della cricca .....	13
2.3 Virtual Crack Closure Technique – VCCT.....	15
2.4 Orthotropic Rescaling.....	17
2.4.1 Problema della cricca da foro ellittico .....	21
<b>3 Materiali, Geometrie e Test Preliminari .....</b>	<b>23</b>
3.1 Materiali utilizzati .....	23
3.2 TCT Test .....	25
3.3 Geometria dei provini per TCT-Test.....	27
3.4 Campagna sperimentale preliminare e discussione dei risultati .....	28
3.5 Geometria Alternativa per lo studio del <i>MODO II</i> .....	31
<b>4 Metodi per l’Analisi Sperimentale e Numerica .....</b>	<b>33</b>
4.1 Indagine Morfologica .....	33
4.2 Digital Image Correlation.....	36
4.3 Thermoelastic Stress analysis .....	40



4.4	Modello numerico .....	45
<b>5</b>	<b>Discussione dei Risultati sperimentali per il TCT-test .....</b>	<b>49</b>
5.1	TCT-test: Morfologia della cricca .....	49
5.2	TCT-test: Test quasistatici e Digital Image correlation .....	53
5.3	TCT-test: Thermoelastic Stress Analysis .....	58
5.4	TCT-test: Frattografia SEM .....	66
5.5	TCT-test: Simulazioni numeriche .....	68
<b>6</b>	<b>Un nuovo setup sperimentale per lo studio della delaminazione a <i>MODO II</i>..</b>	<b>71</b>
6.1	TCT test: overview .....	71
6.2	Geometria e morfologia del setup proposto .....	73
6.3	Test quasistatici e Digital Image Correalation per le nuove geometrie proposte .....	78
6.4	Comportamento del provino con il notch .....	82
6.5	Thermoelastic Stress Analysis per le nuove geometrie proposte .....	83
6.6	Frattografia SEM per la nuova geometria proposta .....	89
6.7	Risultati delle simulazioni numeriche per la nuova geometria proposta .....	91
<b>7</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>93</b>
	<b>Acknowledgements .....</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>99</b>



ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA TENACITÀ A  
FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



## Indice delle Figure

<b>Figura 1 - Evoluzione nel tempo della percentuale in peso di strutture in materiale composito in aeronautica (©Hexcel Corp., Aerostrategy).....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2 - Cedimento dei compositi: Delaminazione (a), Matrix Cracking (b), Fibres Debonding (c) .....</b>	<b>4</b>
<b>Figura 3 - Tipologie di Cedimento.....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 4 - DCB - Double Cantilever Beam.....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 5 - ENF - End Notched Flexure test .....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 6 - Solido di spessore uniforme soggetto al carico <math>P</math> interessato da un difetto di lunghezza <math>a</math>.....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 7 - Sistema di riferimento polare .....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 8 - VCCT: Visione schematica e FEM.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 9 - VCCT nel caso tridimensionale .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 10 - Problema del foro ellittico (a) e risultato del rescaling ortotropico (b) ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 11 - Ciclo di cura per il materiale considerato .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 12 - Rappresentazione schematica del provino per TCT-test .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 13 - Insorgenza della cricca in maniera asimmetrica.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 14 - Tipica Curva Carico-Spostamento per un TCT test .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 15 - Geometrie proposte.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 16 - Scansione angolare per la tomografia computerizzata .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 17 - Calcolo degli spostamenti per la DIC.....</b>	<b>38</b>



<b>Figura 18 - Speckle Pattern .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 19 - Setup sperimentale Per le acquisizioni DIC .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 20 - Termocamera .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 21 - Modello FEM per il TCT-test.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 22 - Schematizzazione del modello analizzato per la nuova configurazione proposta .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 23 - Macrografia della zona vicina alla cricca per un provino TCT .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 24 - Campione realizzato con tecnica Resin-infusion.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 25 - Micro-CT della zona della cricca per un provino per TCT-test.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 26 - Micro-CT Slice.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 27 - Curva tipica Carico-Spostamento e Rigidezza spostamento per un provino in configurazione TCT.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 28 – Mappe delle deformazioni <math>\varepsilon_{zz}</math> lungo la direzione dello spessore .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 29 - Campo delle deformazioni dovute al taglio <math>\tau_{yx}</math>.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 30 - Campo delle deformazioni in direzione longitudinale <math>\varepsilon_{xx}</math> .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 31 - Campione completamente delaminato ad un livello di carico pari a circa 33 kN .....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 32 - Ampiezza del segnale termoelastico per i campioni TCT1 e TCT2 .....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 33 - TCT2 - TSA per ampiezza 1-17 kN.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 34 - Mappe di fase per i provini TCT1 e TCT2 .....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 35 - Zoom sulla zona della cricca - TCT1, 1-17 kN, 6 Hz.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 36 - Mappe in Dissipation Mode al variare dell'ampiezza di carico.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 37 - Mappe in Dissipation Mode al variare della frequenza .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 38 - SEM: Visione di insieme della zona vicina alla cricca trasversale di un provino TCT.....</b>	<b>66</b>



<b>Figura 39 - SEM: Particolare della superficie di frattura per un provino TCT .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 40 - SEM: ingrandimenti maggiori con fibre scollate.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 41 - Andamento della funzione del mode mixity al variare del rapporto tra lo spessore e la lunghezza di cricca .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 42 - Macrografia della zona prossima alla cricca per la nuova geometria proposta .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 43 - Micro-CT per la configurazione analizzata: crack tips .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 44 - Micro-CT della nuova geometria proposta: distribuzione dei difetti .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 45 - Micro-CT della nuova geometria proposta: slice .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 46 - Curva carico spostamento per un provino con geometria modificata. Esempio di provino con Notch .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 47 - Campo delle deformazioni prima del cedimento del pacchetto di resina. 80</b>	
<b>Figura 48 - Campo delle deformazioni a valle del cedimento del pacchetto di resina 80</b>	
<b>Figura 49 - Campi di deformazioni dopo la rottura del pacchetto di resina per un provino senza notch.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 50 - Diagramma Carico spostamento per un provino precriccato senza notch – Immagine del provino dopo il cedimento .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 51 - Delaminazioni in corrispondenza del notch.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 52 - Risultati della TSA per la nuova geometria a valle del cedimento del pacchetto di resina: (a) ampiezza del segnale per un provino senza notch; (b) fase per un provino senza notch; (c) ampiezza del segnale per un provino con notch; (d) fase per un provino con notch. 4 Hz, 1-14 kN .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 53 - Risultato dell'analisi TSA in corrispondenza dei crack tips – Provino senza notch .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 54 - Mappe relative alla seconda armonica per la nuova geometria proposta: (a) Provino senza notch; (b) Provino con notch.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 55 - Risultati dell'analisi termografica per un provino con pacchetto di resina integro (a) e un provino con pacchetto di resina rotto (b).....</b>	<b>87</b>



<b><i>Figura 56 - Mappe relative alla seconda armonica al variare della frequenza di carico</i></b>	<b>88</b>
<b><i>Figura 57 - SEM in corrispondenza del crack tip</i></b>	<b>89</b>
<b><i>Figura 58 - SEM delle superfici di frattura della nuova geometria proposta</i></b>	<b>90</b>
<b><i>Figura 59 - Andamento del Mode Mixity al variare di <math>\alpha</math> per il nuovo setup proposto</i></b>	<b>92</b>





ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA TENACITÀ A  
FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



## Simboli

### Simboli Romani

$G_I$	Rateo di rilascio energetico per il <i>MODE I</i>
$G_{II}$	Rateo di rilascio energetico per il <i>MODE II</i>
$G_{III}$	Rateo di rilascio energetico per il <i>MODE III</i>
$U_d$	Energia Dissipata
$U_s$	Energia potenziale elastica
$U_k$	Energia cinetica
$U_e$	Lavoro delle forze esterne
$R$	Resistenza del materiale
$G_T$	Rateo di rilascio energetico totale
$G_c$	Rateo di rilascio energetico critico
$A$	Area di cricca
$a$	Lunghezza di cricca
$P$	Generico carico
$C$	Cedevolezza
$x$	Direzione x
$y$	Direzione y
$z$	Direzione z
$u$	Spostamento lungo x
$v$	Spostamento lungo y
$w$	Spostamento lungo z
$X$	Forza nodale lungo x
$Y$	Forza nodale lungo y
$Z$	Forza nodale lungo z



1	(Pedice) Direzione principale per la lamina ortotropa – per la lamina unidirezionale, coincidente con $x$
2	(Pedice) Direzione principale per la lamina ortotropa – per la lamina unidirezionale, coincidente con $y$
3	(Pedice) Direzione principale per la lamina ortotropa – per la lamina unidirezionale, coincidente con $z$
$r$	Coordinata radiale per un sistema di riferimento polare
$s$	Ascissa curvilinea
$n$	(Pedice) Normale
$s$	(Pedice) Tangente
$i$	(Pedice) Generica direzione o componente
$j$	(Pedice) Generica direzione o componente
$B$	Dimensione generica lungo $y$ - larghezza
$b$	Dimensione generica lungo $y$ - larghezza
$W_s$	Densità di energia di deformazione
$J$	J-Integral
$K_i$	$i$ -esima componente dello <i>Stress Intensity Factor</i>
$E$	Modulo di Young
$s_{ij}$	Elemento della matrice di rigidezza
$E_1$	Modulo di Young lungo la direzione delle fibre
$E_2$	Modulo di Young lungo la direzione ortogonale alle fibre
$G_{12}$	Modulo di taglio
$U$	Funzione di Airy
$d_1$	Semiasse maggiore dell'ellisse
$d_2$	Semiasse minore dell'ellisse
$A^*$	Vertice dell'ellisse
$B^*$	Vertice dell'ellisse
$m$	Generica costante
$\Upsilon$	Funzione di calibrazione
$G_{IIc}$	Rateo di rilascio energetico critico per il Mode II



$H$	Spessore totale del provino
$t$	Dimensione della cricca trasversale/spessore delle lamine tagliate
$\Delta T$	Variazione di temperatura
$T_0$	Temperatura assoluta del provino
$C_p$	Calore specifico omogeneizzato
$\tilde{A}$	Ampiezza del segnale termoelastico
$L$	Lunghezza totale per un provino TCT

## Simboli Greci

$\Gamma$	Superficie laterale del generico solido a sezione costante
$\theta$	Coordinata angolare di un sistema di riferimento polare
$\nu$	Coefficiente di Poisson per un materiale isotropo
$\nu_{12}$	Coefficiente di Poisson per un materiale ortotropo secondo le convenzioni classiche
$\Delta$	Variazione discreta
$\lambda$	Primo parametro di ortotropia del materiale
$\rho$	Secondo parametro di ortotropia del materiale
$\sigma$	Generica tensione
$\tau$	Generica tensione tangenziale
$\xi$	Operatore di scala
$\pi$	Pi-Greco
$\alpha_1$	Coefficiente di espansione termica lungo la direzione 1
$\alpha_{2,3}$	Coefficiente di espansione termica lungo la direzione 2 e 3
$\phi_c$	Rapporto di spessore tra le lamine tagliate e lo spessore totale per un provino TCT
$\sigma_\infty$	Tensione remota



$\beta$	Angolo di sfasamento tra il carico sinusoidale e l'angolo di fase di campionamento di temperatura
$\tilde{\rho}$	Densità del materiale omogeneizzata
$\Delta\sigma_{1,3}$	Stress in direzione 1 e 3
$\varphi$	Angolo di fase del segnale termoelastico
$\psi$	Grado di mode mixity
$\delta$	Spostamento
$\alpha$	Rapporto tra la lunghezza di cricca e lo spessore del provino
$\chi$	Rapporto tra la distanza orizzontale del centro del notch circolare dai crack tips
$\alpha^*$	Rapporto tra la lunghezza della cricca a partire dal crack tip e lo spessore moltiplicato per l'inverso di $\chi$
$\varepsilon_{xx}$	Deformazioni in direzione x (1)
$\varepsilon_{zz}$	Deformazioni in direzione z (3- spessore)
$\varepsilon_{yx}$	Deformazioni da taglio sul piano di normale y (spessore)

## Abbreviazioni

TCT	<i>Transverse Crack Tensile</i>
NDT	Controlli non distruttivi ( <i>Non-destructive technique</i> )
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
TSA	<i>Thermoelastic Stress Analysis</i>
ERR	Rateo di rilascio energetico ( <i>Energy Release Rate</i> )
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End Notched Flexure</i>
VCCT	<i>Virtual Crack Closure Technique</i>
FEM	Metodo agli elementi finiti ( <i>Finite Element Method</i> )



LEFM	Meccanica della frattura lineare elastica
EPFM	Meccanica della frattura elasto-plastica
SIF	Stress Intensity Factor – Fattore di intensificazione degli sforzi
CT	Computed Tomography
SEM	Scanning Electron Microscope



ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA TENACITÀ A  
FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



# 1 Introduzione

## 1.1 Premessa e motivazioni

Nelle ultime decadi, la richiesta sempre crescente di strutture e macchine che garantiscano alte prestazioni, ha spinto i ricercatori di ogni ambito, sia in campo industriale che nel mondo accademico, alla studio di soluzioni che coinvolgono lo sviluppo di nuovi materiali.

In tal senso, gli alti rapporti di resistenza-peso e rigidezza-peso, hanno fatto sì che l'utilizzo dei materiali compositi sia diventato sempre più frequente fino a sostituire, in applicazioni strutturali, materiali, quali i metalli, tradizionalmente utilizzati sia nell'industria meccanica e aeronautica che nei campi di interesse dell'ingegneria civile.



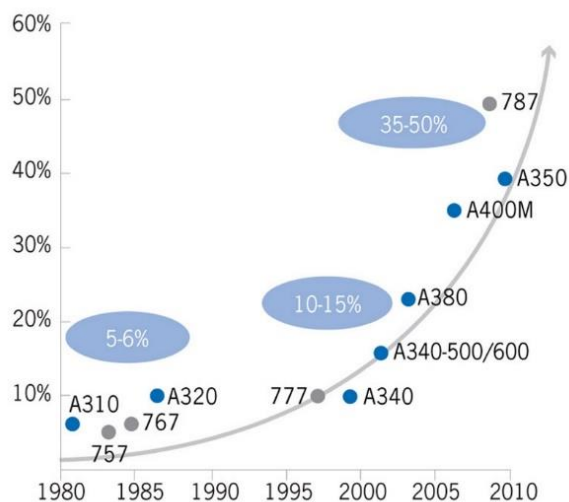


Figura 1 - Evoluzione nel tempo della percentuale in peso di strutture in materiale composito in aeronautica  
(©Hexcel Corp., Aerostrategy)

Nonostante l'uso di tali materiali possa sembrare conveniente sotto ogni aspetto, attualmente, la scarsa padronanza in termini di previsione dei meccanismi di frattura che intercorrono durante il cedimento e, conseguentemente, la limitata conoscenza del comportamento di tali materiali in termini di tolleranza al danno, obbligano i progettisti e gli enti di controllo a considerare coefficienti di sicurezza più alti e imporre processi di certificazione più lunghi e stringenti.

I laminati compositi sono, solitamente, costituiti da una sequenza di strati (*lamine, plies o layers*) opportunamente disposte per resistere ai carichi previsti in fase di progettazione. La separazione tra le lamine (*delaminazione*) è uno dei meccanismi di cedimento più frequenti e costituisce la prima causa di collasso della struttura. Lo sviluppo di metodi di previsione di tale fenomeno è argomento della presente Tesi di Dottorato.



## 1.2 Cedimento dei compositi e Damage Tolerance

Generalmente, la risposta macroscopica dei materiali duttili cambia nelle fasi che precedono il cedimento inteso in senso globale. A titolo di esempio, si ricordi il comportamento degli acciai la cui rottura viene preceduta da fenomeni di snervamento e localizzazione delle deformazioni.

I materiali compositi sono, al contrario, caratterizzati da un comportamento a frattura di tipo fragile. Il cedimento evolve, cioè, ad alte velocità seguendo piani ben definiti e senza apparente preavviso. Tale tipologia di cedimento comporta notevoli rischi in fase operativa perché può avvenire a bassi livelli di energia, in maniera brusca e senza deformazioni plastiche che, in senso lato, possono essere viste come campanelli d'allarme prima del collasso della struttura.

I meccanismi di rottura dei materiali compositi risultano essere notevolmente più complessi rispetto a quelli che caratterizzano i materiali tradizionali a causa dell'anisotropia e delle disomogeneità del sistema. In base all'effetto degli sforzi, si possono distinguere, quindi, cedimenti che interessano la resina (*delaminazione e transverse matrix crack*), cedimenti dell'interfaccia fibra/matrice o cedimento delle fibre a compressione o trazione [1], [2] (Figura 2).

Per le ragioni esposte, risulta essere necessario tenere in considerazione, in fase di progetto, la possibilità che esistano difetti o cricche sin dalle fasi di produzione che possono indurre a una variazione della distribuzione degli sforzi e, in definitiva, ridurre la capacità di risposta globale della struttura.

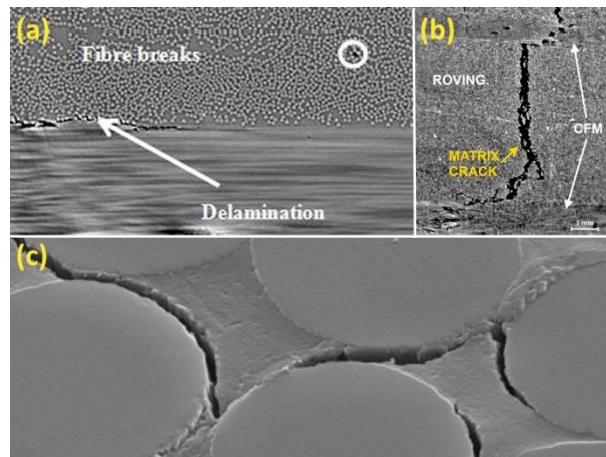


Figura 2 - Cedimento dei compositi: Delaminazione (a), Matrix Cracking (b), Fibres Debonding (c)

La formazione e la propagazione di delaminazioni costituisce una tra le principali cause di cedimento del composito. La separazione tra due lamine adiacenti è una potenziale modalità di cedimento in corrispondenza di ply drop-off, bordi, fori e danni derivanti dai processi di produzione o per cause esterne quali urti o collisioni durante la vita operativa e riduce notevolmente la capacità di risposta della struttura ai carichi esterni [3].

Nasce quindi la necessità di caratterizzare il comportamento a frattura interlaminare dei compositi e di sviluppare opportuni modelli di previsione del cedimento in presenza di difetti che permettano di agire in maniera programmatica e sistematica al fine di evitare il collasso della struttura.

La meccanica della frattura classica, individua tre principali metodologie di cedimento rispettivamente indicate con *Mode I*, *Mode II* e *Mode III*. A tali modi di cedere, sono associati, generalmente, tre diversi valori di rateo di rilascio energetico critico (Energy Release Rate – ERR),  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  e  $G_{IIIc}$  (Figura 3).

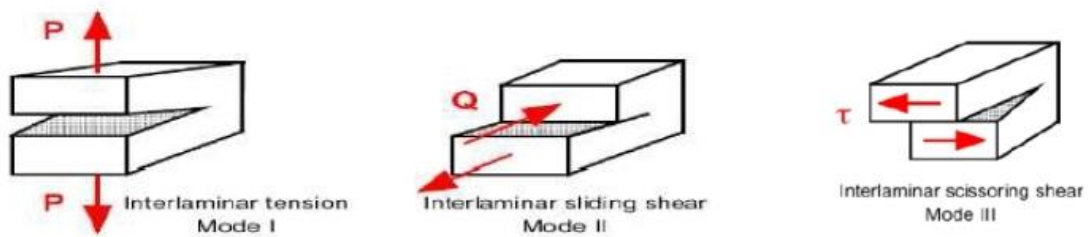


Figura 3 - Tipologie di Cedimento

Il *MODO I* è caratterizzato dall'avere una direzione di avanzamento della cricca ortogonale all'asse di carico. Solitamente, in presenza di tale tipo di delaminazione si osservano fenomeni di fiber bridging [3], frattura adesiva/coesiva, fibre pull-out e fiber debonding. Attualmente, le prove sperimentali atte a determinare la tenacità a frattura per tale tipo di cedimento, sono standardizzate dall' *American Society for Testing and Materials* (ASTM), e le cui linee guida sono disponibili nel documento *ASTM D5528 – 13* [4]. La prova viene eseguita su un provino con spessore costante pre-criccato in corrispondenza del piano medio del laminato per una estensione predefinita (Double Cantilever Beam - DCB). Il carico di apertura è applicato tramite cerniere opportunamente incollate in prossimità dei due bordi liberi in modo da mantenerne la direzione costante e la propagazione della cricca viene indotta per separazione delle due porzioni (Figura 4).

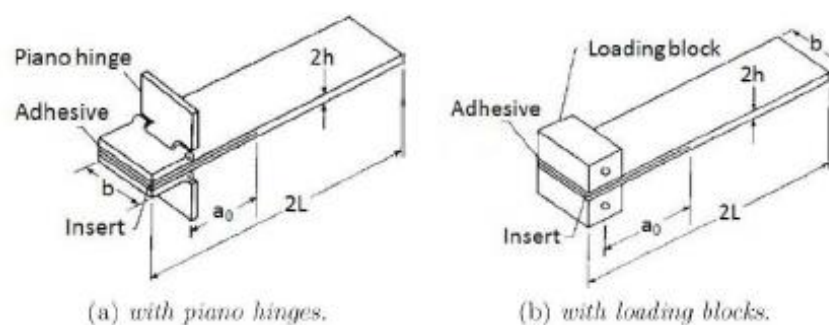


Figura 4 - DCB - Double Cantilever Beam

Oggetto di questa tesi è lo studio della danno interlaminare che interviene per cedimento a *MODO II*.

Attualmente, l'American Society for Testing and Materials, propone come protocollo standard l'ASTM – D7905, End Notched Flexure (ENF) [5]. Il test consiste in una prova di flessione a tre punti eseguita su un provino opportunamente preparato, di geometria simile a quello utilizzato per il DCB test (Figura 5).

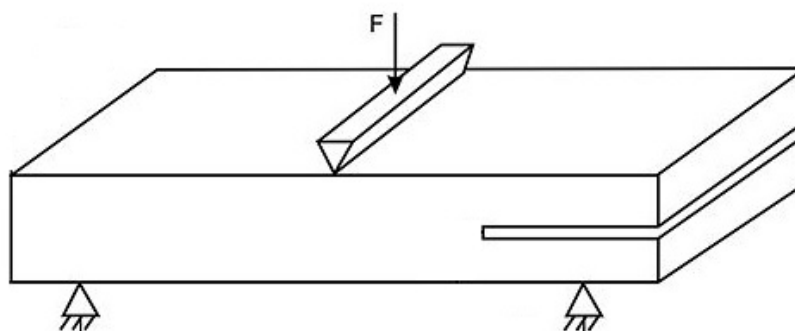


Figura 5 - ENF - End Notched Flexure test

Tuttavia, tale test risulta complesso e affetto da molteplici variabili quali l'attrito e carichi attraverso lo spessore. Inoltre, l'ENF-test può essere applicato con successo a materiali compositi unidirezionali in cui è garantita la simmetria geometrica ed elastica rispetto al piano di giacitura della pre-cricca. Di conseguenza, il setup sperimentale proposto dallo standard non può essere applicato a configurazioni ibride in quanto la rigidità del materiale varierebbe attraverso lo spessore inducendo degli effetti secondari che invaliderebbero il risultato sperimentale.

Di seguito, verrà presentato lo studio approfondito di un setup sperimentale utilizzato in campo aeronautico per la determinazione della tenacità a frattura per



scorrimento da taglio (*MODO II*). In particolare verrà presentato un test basato su configurazioni cut-plyes in cui un certo numero di lamine (nel caso specifico unidirezionali) viene tagliato in due porzioni simmetriche e poste a cavallo del piano medio del laminato. La geometria considerata viene, quindi, caricata a trazione semplice e la differenza di rigidzze tra le diverse zone del provino induce la nascita di sforzi di interfaccia che provocano la nascita e la propagazione della cricca. Variando i materiali utilizzati, è possibile, dunque, studiare il comportamento a frattura interlaminare a *MODO II* di compositi ibridi poiché la simmetria elastica può essere facilmente mantenuta. Si riporta alle sezioni successive per la descrizione dettagliata del test.

La seconda parte della tesi è dedicata allo studio della progettazione e sviluppo di un protocollo sperimentale alternativo che permette di superare le difficoltà insite nelle prove con configurazioni cut-plyes tradizionalmente utilizzate.

### 1.3 Overview della tesi

I principali punti di innovazione presentati nel lavoro di tesi sono riportati del seguente elenco puntato.

- Utilizzo di metodi non distruttivi per lo studio dello stato tensionale nell'intorno della cricca. In particolare sono stati utilizzati la Digital Image Correlation (DIC) e la Thermoelastic Stress Analysis (TSA) per valutare l'effettivo campo delle deformazioni e delle tensioni nel provino caricato. Inoltre la DIC è stata utilizzata con la funzione di crack detector e ha fornito informazioni utili sulla effettiva precisione del test.



Parallelamente, la TSA è stata utilizzata anche per la valutazione di fenomeni dissipativi durante l'evoluzione del danno;

- Estensione dei risultati ottenuti a materiali diversi da quelli interessati dalla campagna sperimentale tramite *orthotropic rescaling*;

Di seguito è riportata una breve descrizione di ogni capitolo sviluppato nella tesi.

**Capitolo 1:** introduzione alla tesi e le motivazioni che hanno spinto allo svolgimento dell'attività di ricerca che ha interessato il corso Dottorato;

**Capitolo 2:** descrizione delle basi della meccanica della frattura al fine di agevolare la lettura delle sezioni successive. Sono inoltre presentati i modelli analitici (*orthotropic rescaling*) e numerici (Virtual Crack Closer Technique – VCCT) applicati nello studio;

**Capitolo 3:** descrizione del Transverse Crack Tension Test (TCT-test). Nello stesso capitolo verranno presentati i materiali utilizzati e il setup di prova. Inoltre, verranno discussi i risultati sperimentali concernenti la campagna preliminare eseguita in tale configurazione e verrà introdotta la configurazione alternativa per lo studio del MODO II;

**Capitolo 4:** descrizione dei metodi utilizzati per l'indagine sperimentale e del modello numerico agli elementi finiti (FEM);

**Capitolo 5:** discussione dei risultati sperimentali sul TCT-test;

**Capitolo 6:** presentazione e validazione del metodo alternativo proposto: risultati sperimentali e discussione degli stessi;

**Capitolo 7:** conclusioni e sviluppi futuri.



## 2 Meccanica della Frattura e metodologie di calcolo

La meccanica della frattura è la branca della meccanica dei materiali che si occupa dello studio del comportamento di elementi solidi in presenza di difetti o danneggiamenti. In particolare, l'obiettivo a cui si rivolgono gli studi abbracciati da tale disciplina è la descrizione analitica o numerica dei fenomeni fisici che riguardano la nascita e l'evoluzione del danno all'interno delle strutture, in dipendenza della loro geometria e tenuto conto delle configurazioni di carico a cui esse sono sottoposte.

Tra le conclusioni più importanti a cui si è arrivati in tale ambito, vi è il concetto secondo il quale il difetto non fa diminuire la capacità del materiale di resistere ma modifica il campo delle tensioni nell'area interessata dallo stesso incrementandone la sua intensità rispetto alla tensione nominale registrata in zone non disturbate. Se le sollecitazioni indotte dalla presenza del difetto superano i limiti di resistenza del





materiale, quindi, ha luogo la propagazione e, nei casi più estremi, il cedimento completo della struttura [6].

La meccanica della frattura può essere divisa in due rami principali: la meccanica della frattura elastico lineare (*Linear Elastic Fracture Mechanics* – LEFM) applicata soprattutto a materiali dal comportamento fragile, e la meccanica della frattura elastoplastica (*Elasto-Plastic Fracture Mechanics* – EPFM) che meglio descrive il cedimento nei materiali interessati da fenomeni di plasticizzazione.

In particolare la LEFM è fu introdotta da Griffith e si basa su due concetti fondamentali [7]:

- in tutti i corpi sono presenti difetti e disomogeneità;
- la crescita del difetto può essere descritta valutando l'energia necessaria per la creazione di nuove superfici di frattura.

Nella sezione seguente verrà presentato il modello energetico per la determinazione della *fracture toughness*.

## **2.1 Criterio energetico per la valutazione delle proprietà di tenacità a frattura**

Si consideri un generico corpo di spessore costante interessato, per intero, da una cricca di geometria nota (Figura 6).

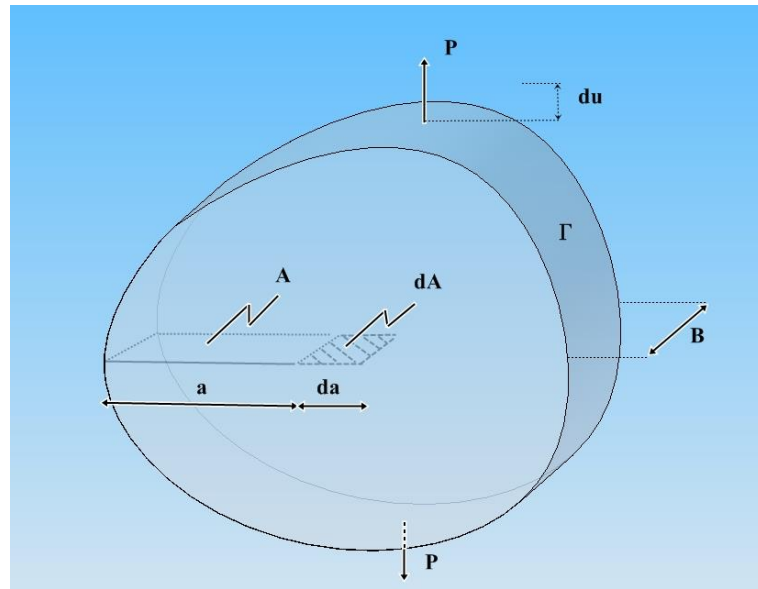


Figura 6 - Solido di spessore uniforme soggetto al carico  $P$  interessato da un difetto di lunghezza  $a$

Indicando con  $U_d$  l'aliquota di energia dissipata, con  $U_s$  l'energia potenziale elastica accumulata e con  $U_k$  l'energia cinetica del sistema, è possibile scrivere la seguente relazione di bilanciamento energetico

$$\dot{U}_e = \dot{U}_s + \dot{U}_d + \dot{U}_k + BR\dot{a} \quad 2.1$$

dove  $U_e$  è il lavoro compiuto dalle forze esterne e l'ultimo termine descrive tutti gli effetti di dissipazione che concorrono a conferire la resistenza a frattura del materiale  $R$ . Ponendosi in condizione di propagazione lenta e stabile (quasistatica) e in campo elastico lineare, è possibile riscrivere la 2.1 come

$$\dot{U}_e = \dot{U}_s + BR\dot{a} \quad 2.2$$

Definendo  $G_T$  tasso di rilascio energetico (*Energy release rate*, di seguito *ERR*) come quella quantità legata all'energia necessaria per una propagazione di lunghezza unitaria della cricca, imponendo che la propagazione avvenga al valore critico  $G_C$  è possibile scrivere la seguente uguaglianza

$$BG_T\dot{a} = \dot{U}_e - \dot{U}_s = BR\dot{a} \quad 2.3$$



dove  $G_T$  trova espressione nella seguente 2.4

$$G_T = \frac{1}{B} \left( \frac{dU_e}{da} - \frac{dU_s}{da} \right) \quad 2.4$$

Nel caso generale rappresentato in Figura 6, le aliquote tra parentesi dell'equazione 2.4 possono scriversi come

$$\frac{dU_e}{da} = P \left( \frac{du}{da} \right) \quad 2.5$$

$$\frac{dU_s(u, P, a)}{da} = \frac{d}{da} \int_0^u P du \quad 2.6$$

Differenziando  $U_s$  secondo  $a$  e secondo  $u$

$$\frac{dU_s}{da} = \frac{dU_s}{da} + \frac{dU_s}{dP} \frac{dP}{da} + \frac{dU_s}{du} \frac{du}{da} \quad 2.7$$

$$\frac{\partial U_s}{\partial a} = P \quad 2.8$$

Nel caso lineare elastico, considerando che  $U_s = 0.5Pu$ , ricordando che

$$\frac{du}{da} = P \frac{dC}{da} + C \frac{dP}{da} \quad 2.9$$

dove  $C = u/P$  è la cedevolezza, e manipolando le formule precedenti si ottiene l'equazione di Irwin-Kies

$$G_T = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad 2.10$$

Secondo tale espressione, l' $ERR$  dipende dalla geometria del campione in relazione alla lunghezza della cricca e alle proprietà meccaniche del materiale. La derivata a secondo membro può essere quindi valutata sperimentalmente misurando la cedevolezza del campione per data lunghezza di cricca.

## 2.2 Criterio locale e stato tensionale all'apice della cricca

Si definisca un sistema di coordinate polare centrato nell'apice di cricca come indicato in Figura 7.

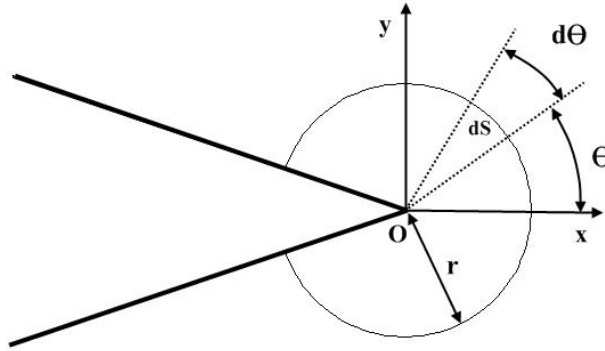


Figura 7 - Sistema di riferimento polare

Il carichi esterni possono essere tradotti in termini di tensioni nelle loro componenti tangenti  $\sigma_s$  e normali  $\sigma_n$  al generico contorno considerato. Nel caso di solido elastico e isotropo, la 2.4 può essere scritta come

$$\frac{1}{B} \frac{dU_e}{da} = \int_S \left( \sigma_n \frac{du_n}{dx} + \sigma_s \frac{du_s}{dx} \right) dS \quad 2.11$$

$$\frac{1}{B} \frac{dU_s}{da} = \int_S W_s dA \quad 2.12$$

essendo  $W_s$  la densità di energia di deformazione. Operando le opportune trasformazioni si ottiene l'espressione dell'integrale J (in seguito *J-Integral*) valido per qualsiasi sistema elastico, isotropo e omogeneo [8].

$$G_T = J = \int_S W_s dy - \left( \sigma_n \frac{du_n}{dx} + \sigma_s \frac{du_s}{dx} \right) dS \quad 2.13$$



È possibile descrivere analiticamente il campo delle tensioni e degli spostamenti in coordinate polari secondo le seguenti espressioni:

$$\sigma_{ij} = r^{-1/2} \cdot f(\theta, K_i) \quad 2.14$$

$$u_i = r^{1/2} \cdot g(\theta, K_i) \quad 2.15$$

Dove le funzioni  $f(\theta, K_i)$  e  $g(\theta, K_i)$  tengono conto della coordinata angolare e delle condizioni al contorno del sistema e  $i, j = 1, 2, 3$ . In particolare, le  $K_i$  sono costanti legate all'effettiva intensità dei campi nell'intorno della cricca. Tenuto, quindi, conto del loro carattere, è possibile semplificare la 2.14 come segue:

$$\sigma_{ij} = K_i r^{-1/2} \cdot f(\theta) \quad 2.16$$

Dove  $K_i$  prende il nome di fattore di intensificazione degli sforzi (*Stress Intensity Factor* – nel seguito, SIF).

È possibile dimostrare che lo SIF è legato all'ERR dalla seguente relazione:

$$G = K_I^2 \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) + K_{II}^2 \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) \quad 2.17$$

In cui si è trascurato il contributo dovuto al *MODO III*.  $G_T$  è, altresì, somma di due contributi legati ai due modi di cedere considerati  $G_T = G_I + G_{II}$  dove

$$G_I = \frac{1}{2} \pi f_n(0) g_n(\pi) \quad 2.18$$

$$G_{II} = \frac{1}{2} \pi f_s(0) g_s(\pi) \quad 2.19$$

dove  $n$  indica il contributo normale e  $s$  il contributo dovuto al taglio.

Nel paragrafo seguente verrà presentato un metodo numerico per il calcolo del rateo di rilascio energetico.

### 2.3 Virtual Crack Closure Technique – VCCT

Come già esposto, in meccanica della frattura elastico-lineare, la nucleazione della cricca e la sua propagazione avviene per  $G_T > G_c$ , essendo  $G_T$  l'ERR e  $G_c$  la tenacità a frattura.

Nel caso di analisi numerica FEM, tra i metodi più utilizzati per il calcolo del rateo di rilascio energetico vi è la *Virtual Crack Closure Technique* (nel seguito VCCT) che si basa sull'assunzione di Irwin secondo il quale il lavoro svolto dalle forze applicate per produrre delle superfici di frattura (forze di apertura della cricca) è pari al lavoro che le forze di coesione devono svolgere per riportare la cricca stessa alle dimensioni originarie [9].

Considerando che tali forze, nel caso di analisi FEM, sono calcolabili valutando le forze nodali nelle loro componenti normali e di taglio, è possibile ricavare le aliquote  $G_I$  e  $G_{II}$  dovute rispettivamente al *MODO I* e al *MODO II*.

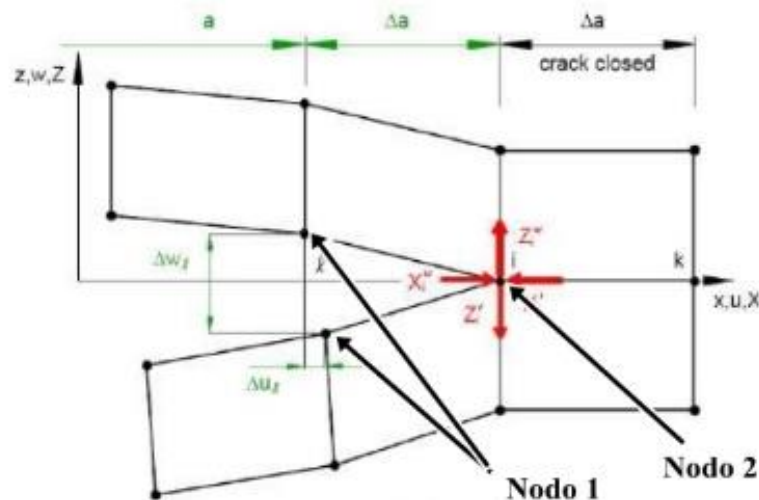


Figura 8 - VCCT: Visione schematica e FEM

Con riferimento alla Figura 8, in condizioni quasistatiche, il rateo di rilascio energetico risulta essere calcolabile come segue:

$$G_T = -\frac{1}{2\Delta a}(X_2 \cdot \Delta u_1 + Z_2 \cdot \Delta w_1) \quad 2.20$$

Dove  $X_2$  e  $Z_2$  sono le forze agenti sul *nodo 2* e  $\Delta u_1$  e  $\Delta w_1$  sono gli spostamenti relativi nelle direzioni  $x$  e  $z$  dei nodi gemelli individuati dalla dicitura “*nodo 1*”.

Dalla 2.20 è possibile separare i contributi dovuti al *MODO I* e *MODO II* come segue

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a}Z_2 \cdot \Delta w_1 \quad 2.21$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a}X_2 \cdot \Delta u_1 \quad 2.22$$

Tale metodo può essere riportato nel caso tridimensionale considerando che  $\Delta A = b \cdot \Delta a$  e la seguente Figura 9.

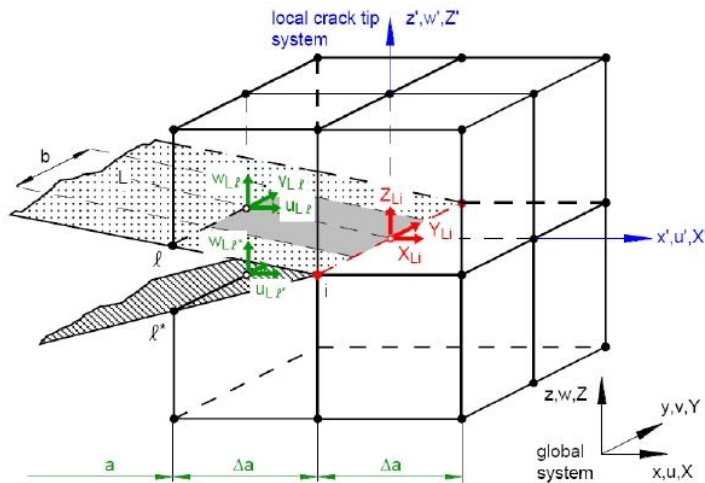


Figura 9 - VCCT nel caso tridimensionale

La VCCT fornisce importanti informazioni sullo stato energetico nell'intorno della cricca e sulla stabilità della propagazione della stessa. Tuttavia, essa richiede complesse tecniche di ridefinizione delle *mesh* lungo il fronte di delaminazione con conseguente aumento dei costi computazionali. Inoltre, con tale tecnica, la



simulazione non prevede l'individuazione del punto di nucleazione della cricca. Per tale ragione, è necessario definire a priori il punto di innesco o una pre-delaminazione in modo che sia possibile stimare gli spostamenti relativi dei nodi adiacenti all'apice del difetto.

Nel caso di geometrie semplici, come nel caso oggetto di studio del seguente lavoro di tesi, la VCCT costituisce un metodo veloce ed efficace per la determinazione del rateo di rilascio energetico tramite simulazioni agli elementi finiti.

Nella sezione seguente verrà presentato un metodo di *Orthotropic Rescaling* che permetterà di generalizzare ed estendere i risultati conseguiti a geometrie simili e materiali che differiscono in termini di ortotropia.

## 2.4 Orthotropic Rescaling

Siano definite le seguenti due costanti adimensionali:

$$\lambda = \frac{s_{11}}{s_{22}} \quad 2.23$$

$$\rho = \frac{2s_{12} + s_{66}}{2\sqrt{s_{11}s_{22}}} \quad 2.24$$

dove gli elementi  $s_{ij}$  sono elementi della matrice di cedevolezza definita dalla legge di Hook per un materiale ortotropo. Tali costanti possono essere riscritte in termini di quantità ingegneristiche come segue:

$$\lambda = \frac{E_2}{E_1} \quad 2.25$$

$$\rho = \frac{(E_1 E_2)^{1/2}}{2G_{12}} - (v_{12} v_{21})^{1/2} \quad 2.26$$





Nel caso di stato piano di tensione, le definizioni 2.25 e 2.26 permettono di sviluppare un modello matematico utile a ridurre i problemi di elasticità piana per materiali ortotropi in problemi equivalenti a simmetria cubica. D'altra parte, questi ultimi sotto condizioni particolari, possono essere approssimati a problemi in condizioni di isotropia.

Dal punto di vista pratico, il modello proposto da Suo [10], partendo, quindi, dalle soluzioni note in letteratura per corpi isotropi, tramite procedura in routine facilmente implementabile come codice numerico in tool di calcolo ad-hoc, permette di estrapolare la soluzione approssimata per il caso ortotropo nella stessa configurazione. Inoltre, le tecniche di re-scaling permettono di ridurre notevolmente i costi in termini di risorse utilizzate per la compilazione di soluzioni numeriche e analitiche per geometrie e configurazione utilizzate classicamente per lo studio del comportamento meccanico dei materiali.

Le costanti indicate in 2.25 e 2.26 descrivono il livello di ortotropia del materiale. In particolare, nel caso di materiale isotropo,  $\lambda = \rho = 1$ . Altresì,  $\lambda = 1$  nei solidi a simmetria cubica. Per la trattazione seguente, è importante definire i materiale ad *ortotropia degenera* in cui  $\rho = 1$  e  $\lambda \neq 1$ . È possibile dimostrare che  $\lambda > 1$  e  $\rho > -1$ .

Si introducano le funzioni di Airy tali che

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad 2.27$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad 2.28$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \quad 2.29$$

Lekhnitskii [11] propone la equazione di compatibilità:

$$\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + 2\rho\lambda^{1/2} \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} + \lambda \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \quad 2.30$$

Le 2.27-2.30 descrivono lo stato tensionale che dipende dalle proprietà del materiale attraverso  $\rho$  e  $\lambda$ .

Si operi un rescaling della variabile  $x$  attraverso la seguente relazione:

$$\xi = \lambda^{1/4} x \quad 2.31$$

Combinando la 2.30 e la 2.31 è possibile scrivere

$$\frac{\partial^4 U}{\partial \xi^4} + 2\rho \frac{\partial^4 U}{\partial \xi^2 \partial y^2} + \lambda \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \quad 2.32$$

mentre le 2.27-2.29 diventano

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad 2.33$$

$$\lambda^{-1/2} \sigma_y = \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} \quad 2.34$$

$$\lambda^{-1/4} \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 U}{\partial \xi \partial y} \quad 2.35$$

Osservando che la variabile  $\lambda$  è assorbita dai parametri geometrici e di carico, si può concludere che il problema delle condizioni al contorno considerate nel piano  $(\xi y)$  è dipende solo da una costante del materiale  $\rho$ . Inoltre, nel caso in cui  $\rho = 1$  l'equazione 2.32 diventa uguale all'equazione di governo per i materiali isotropi per cui le soluzioni per le analisi di tali materiali possono essere ricavate a partire da ben note soluzioni presenti in letteratura.



Come mostrato in senso generale in questa sezione, è possibile effettuare la procedura di scaling anche per i parametri che descrivono il comportamento a frattura del materiale. In particolare, si consideri una cricca lungo la direzione  $x$  coincidente con l'asse principale del materiale 1. In questo caso valgono le seguenti espressioni per lo *Stress Intensity Factor* (SIF):

$$K_I \sim \sigma_y \sqrt{2\pi x} \quad 2.36$$

$$K_{II} \sim \tau_{xy} \sqrt{2\pi x} \quad 2.37$$

Le 2.36 e 2.37, nel piano  $(\xi y)$  diventano

$$\lambda^{-3/8} K_I \sim \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} \sqrt{2\pi \xi} \quad 2.38$$

$$\lambda^{-1/8} K_{II} \sim - \frac{\partial^2 U}{\partial \xi \partial y} \sqrt{2\pi \xi} \quad 2.39$$

In maniera analoga possono essere ricavati gli SIF nel caso della cricca in direzione  $y$  ottenendo quanto segue:

$$K_I \sim \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \sqrt{2\pi y} \quad 2.38$$

$$\lambda^{-1/4} K_{II} \sim - \frac{\partial^2 U}{\partial \xi \partial y} \sqrt{2\pi \xi} \quad 2.39$$

Vengono forniti inoltre le relazioni tra ERR e SIF nel caso della cricca in direzione  $x$ :

$$G_I = \left( s_{11} s_{22} \frac{1 + \rho}{2} \right)^{1/2} \lambda^{-1/4} K_I^2 \quad 2.38$$

$$G_{II} = \left( s_{11} s_{22} \frac{1 + \rho}{2} \right)^{1/2} \lambda^{1/4} K_{II}^2 \quad 2.39$$

e in direzione  $y$ :

$$G_I = \left( s_{11} s_{22} \frac{1 + \rho}{2} \right)^{1/2} \lambda^{1/4} K_I^2 \quad 2.38$$

$$G_{II} = \left( s_{11} s_{22} \frac{1 + \rho}{2} \right)^{1/2} \lambda^{-1/4} K_{II}^2 \quad 2.39$$

In entrambi i casi, l'energia totale è data dai due singoli contributi per il *MODO I* e *MODO II* [12].

Nella sottosezione seguente viene proposto un esempio pratico di applicazione della tecnica di rescaling ortotropico.

#### 2.4.1 Problema della cricca da foro ellittico

A titolo di esempio applicativo, verrà, in questa sezione, affrontato il problema della cricca che si estende a partire da un foro ellittico in una piastra infinita con materiale ortotropo.

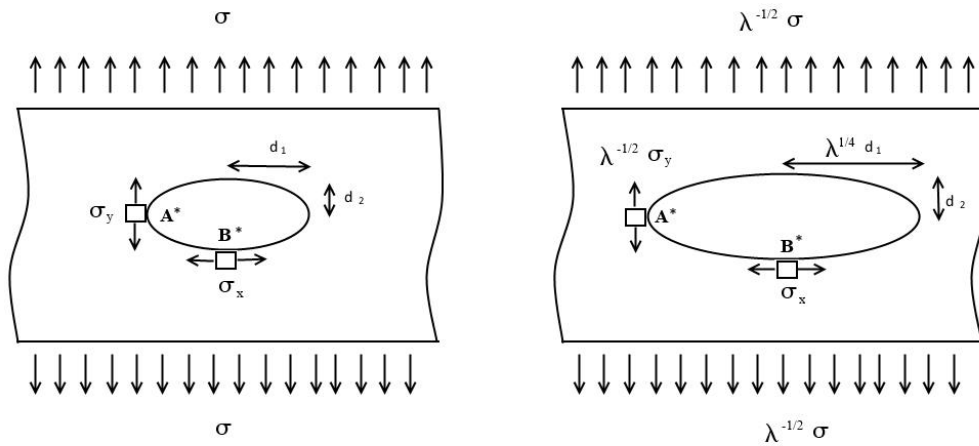


Figura 10 - Problema del foro ellittico (a) e risultato del rescaling ortotropico (b)

In riferimento alla Figura 10 Tenendo conto della trasformazione 2.31 e della definizioni delle condizioni al contorno 2.33-2.35 che determinano le funzioni di Airy, è possibile dimostrare che lo stress in A\* vale quanto segue [10]



$$\frac{\sigma_y(A^*)}{\sigma} = C(\rho, \lambda^{1/4} d_1/d_2) \quad 2.40$$

D'altra parte, Peterson [13] fornisce la forma del fattore di concentrazione degli stress  $C$

$$C(1, m) = 1 + 2m \quad 2.41$$

Per un materiale ad *ortotropia degenerata* in cui  $\rho = 1$ , confrontando la 2.40 e la 2.41 si ottiene

$$C(1, m) = 1 + 2\lambda^{1/4} d_1/d_2 \quad 2.42$$

Quindi l'ortotropia del materiale influenza il campo degli stress agendo da fattore di amplificazione.

Lekhnitskii [11] fornisce, inoltre la soluzione per un foro circolare in materiale ortotropo:

$$C(1, m) = 1 + \sqrt{2}(1 + \rho)^{1/2} m \quad 2.42$$

Confrontando, infine, la 2.40 e la 2.42 si ottiene

$$C(1, m) = 1 + \sqrt{2}(1 + \rho)^{1/2} \lambda^{1/4} d_1/d_2 \quad 2.42$$

Viene fornito inoltre il valore dello SIF

$$K_I = \mathbb{Y} \sigma \sqrt{\pi a} [1 + \sqrt{2}(1 + \rho)^{1/2} \lambda^{1/4} d_1/d_2] \quad 2.43$$

$$\mathbb{Y} = 1.12 - 0.011(\rho - 1) \quad 2.44$$

Dove  $\mathbb{Y}$  è una funzione di calibrazione ottenuta da simulazioni numeriche [14].



### 3 Materiali, Geometrie e Test Preliminari

In questa sezione della tesi di Dottorato, verranno presentati i materiali e le geometrie prescelte per sviluppare il lavoro di ricerca. In particolare, nella prima parte, verranno presentate le caratteristiche del materiale utilizzato. La seconda parte si articolerà in più momenti: verranno presentati la geometria del *Transverse Crack Tensile Test* (TCT-test) e i risultati di una campagna sperimentale preliminare volta all'osservazione qualitativa macroscopica del comportamento dei campioni. Infine, verrà introdotta una geometria alternativa al TCT-test per lo studio della delaminazione al *MODO II*.

#### 3.1 Materiali utilizzati

I pannelli da cui si sono ricavati i campioni sono stati preparati utilizzando tessuti preimpregnati in fibra unidirezionale di carbonio e resina epossidica Hexcel IM7-

8552. La cura del materiale, secondo le specifiche del produttore, è avvenuta sotto  
pressa a caldo seguendo un ciclo pressione-temperatura-tempo predefinito [15].

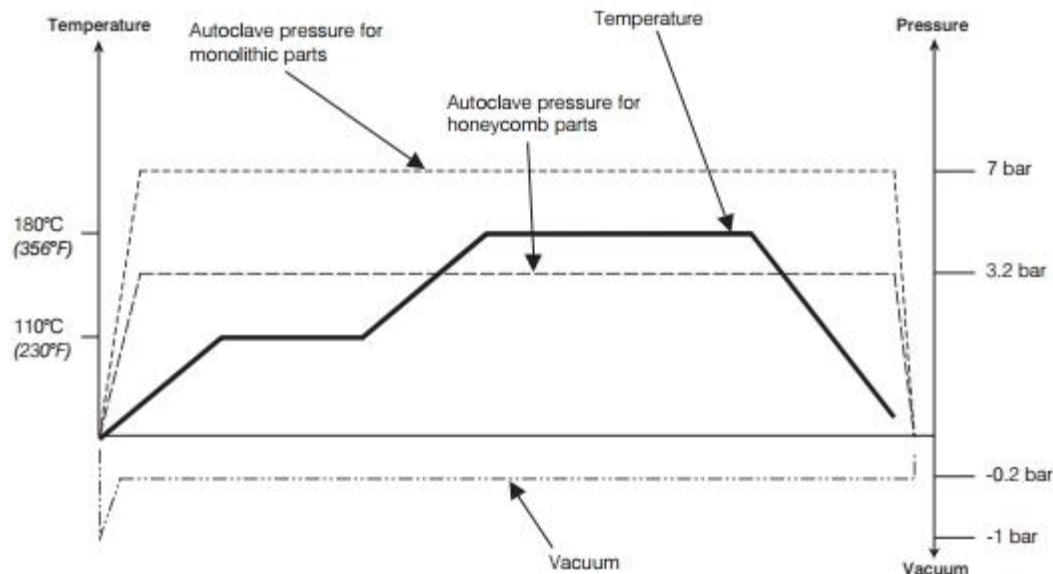


Figura 11 - Ciclo di cura per il materiale considerato

Il materiale ottenuto dopo processo di cura è un composito a base epossidica  
rinforzato con fibre di carbonio ad alte prestazioni principalmente usato in industria  
aeronautica. Tale tipo di materiale presenta buona resistenza all'impatto e tolleranza  
al danno ed è capace di operare fino a temperature di 121°C. Alcune proprietà di  
interesse per le analisi esposte nelle sezioni successive sono riportate nella seguente  
Tabella 1.

<b>E<sub>1</sub> [GPa]</b>	171.420
<b>E<sub>2</sub> / E<sub>3</sub> [GPa]</b>	9.08
<b>G<sub>12</sub> [GPa]</b>	5.29
<b>ν<sub>12</sub></b>	0.32
<b>α<sub>1</sub> [1/°C]</b>	-5.5 × 10 <sup>-6</sup>
<b>α<sub>2</sub> , α<sub>3</sub> [1/°C]</b>	25.8 × 10 <sup>-6</sup>

Tabella 1 - Proprietà dell'IM7-8552

Le singole lamine sono state tagliate manualmente nelle dimensioni volute con l'ausilio di un cutter e la sequenza di laminazione è stata realizzata all'interno di clean room classe 10K, ISO 7. Infine, come indicato dal produttore, lo spessore della singola lamina a cura avvenuta è di circa 0.125 mm.

Per questa tipologia di materiale,  $\alpha_{11}$  è, in modulo, di un ordine di grandezza più piccolo di  $\alpha_{22}$  e di segno opposto. Tale peculiarità, come meglio esposto in seguito, risulterà utile per l'analisi termoelastica degli stress.

### 3.2 TCT Test

Il test considerato e analizzato nel seguente lavoro di tesi di Dottorato è il *Transverse Crack Tensile Test* (TCT-test) schematicamente rappresentato in Figura 12.

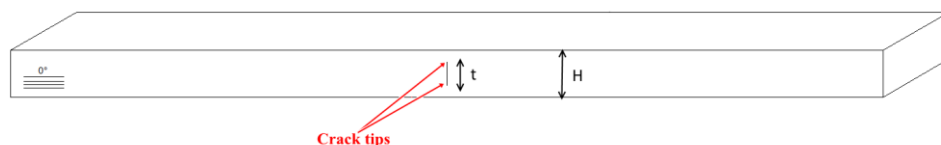


Figura 12 - Rappresentazione schematica del provino per TCT-test

Tale tipologia di test è stata introdotta all'inizio degli anni '90 ed è ancora oggi utilizzata dall'industria aeronautica come metodo di misura per la tenacità a frattura a *MODO II*. Il test consiste nel sottoporre a trazione, lungo la direzione delle fibre, un provino di spessore  $H$  in cui è stata realizzata una cricca trasversale a cavallo del piano medio del laminato per una dimensione pari ad  $t$ . Tale cricca è ricavata tagliando in direzione trasversale un certo numero di lamine e ponendole nella



posizione prevista in fase di laminazione del composito e prima dell'inizio del processo di cura. Caricando il provino, tenendo conto del modello schematico di Figura 12, una volta raggiunto il carico critico, quattro cricche simmetriche si propagheranno a partire dai *crack-tips* in direzioni a due a due opposte seguendo il piano di interfaccia tra le lamine integre e quelle discontinue. La valutazione del carico corrispondente al cedimento permette di calcolare il valore di ERR critico secondo la relazione seguente:

$$G_{IIc} = \sigma_{\infty}^2 \frac{H}{4E_{11}} \left( \frac{1}{\phi_c} - 1 \right) \quad 3.1$$

Essendo  $\sigma_{\infty}$  lo stress misurato in posizione remota rispetto alla curva e  $\phi_c$  il rapporto tra lo spessore delle lamine integre e lo spessore totale del provino.

La tenacità a frattura del materiale gioca un ruolo fondamentale nel campo della predizione e della descrizione del cedimento delle strutture, e, secondo le teorie classiche, è una caratteristica intrinseca del materiale. In contrapposizione a questo, alcuni autori [16][17] hanno osservato e riportato degli effetti di scala dipendenti dal rapporto tra gli spessori delle lamine integre e discontinue. In particolare, è stato riportato che sia il valore di ERR critico che la stabilità della propagazione è profondamente influenzata dalla geometria del campione e che tale influenza diminuisce all'aumentare degli spessori. Per spiegare tale comportamento, gli Autori hanno considerato la presenza di un campo di tensione trasversale (*through-the-thickness stresses*) la cui intensità è legata allo spessore del campione.

Tale ipotesi è stata investigata numericamente da Van Der Meer e Sluys [18] che, nel contempo, hanno proposto un modello capace di predire, con buona



approssimazione, gli effetti di scala considerando la presenza di fenomeni dissipativi.

Dalla ricerca bibliografica si è evinto che non sono state svolte indagini sperimentali atte all'osservazione diretta dei fenomeni che intercorrono durante l'esecuzione dei test.

### 3.3 Geometria dei provini per TCT-Test

Sono stati realizzati un totale di 4 pannelli con spessori variabili mantenendo costante il rapporto  $\phi_c = 0.5$ . Dai pannelli sono, dunque, stati ricavati dei campioni con dimensione  $20 \times 200 \text{ mm}^2$ . La Tabella 2 riporta schematicamente gli spessori e i codici utilizzati per l'identificazione dei provini.

Campagna	Set ID	Codice campione	Numero di lamine totale	Spessore [mm]
<i>Preliminare</i>	1	TCT-1_	12	1.5
	2	TCT-2_	24	3.0
	3	TCT-3_	38	4.5
<i>Principale</i>	4	TCT-4_	32	4.0

Tabella 2 - Codici di identificazione delle campagne sperimentali

Essendo  $\phi_c = 0.5$ , gli spessori interessati dalla cricca trasversale sono, quindi, rispettivamente, 0.75 mm, 1.5 mm, 2.25 mm e 2 mm.

La prima fase della campagna, che ha interessato i set 1, 2 e 3, non ha coinvolto metodi di indagine sperimentale particolari ma è stata mirata all'osservazione diretta del test e alla calibrazione della seconda fase. Nel paragrafo seguente verranno illustrati i principali risultati ottenuti dalla fase preliminare.



Nella seconda fase i test sono stati eseguiti con una macchina universale prova materiali (UTM) servo-idraulica MTS 810 equipaggiata con cella di carico da 100 kN. In particolare, 5 campioni per geometria sono stati testati in controllo di forza con un rateo pari a 10 kN/min. Parallelamente ai test quasistatici, sono stati eseguiti dei test con carico sinusoidale in campo elastico e a diverse frequenze e ampiezze al fine di valutare la risposta termoelastica del provino.

### **3.4 Campagna sperimentale preliminare e discussione dei risultati**

Nella prima fase dello studio sperimentale, sono stati testati quasistaticamente tre set di campioni al variare dello spessore mantenendo costante il rapporto tra gli spessori totali e gli spessori delle lamine interessate dalla cricca trasversale. Tale valore è stato mantenuto pari a  $\phi_c = 0.5$ . Sono stati realizzati tre pannelli in resina epossidica rinforzati con fibre di carbonio unidirezionale (Hexcel IM7-8552) procedendo all'impacchettamento manuale e, in seguito, sottoponendo la sequenza di laminazione a processo di cura in pressa a caldo secondo quanto indicato in sezione 3.1. Sono state utilizzate un totale di 12, 24 e 38 lamine rispettivamente spessori di 1.5 mm, 3 mm e 4 mm, rispettivamente. Il 50% delle lamine per ogni pannello sono state tagliate in direzione trasversale alle fibre e sono state posizionate a cavallo del piano medio del laminato. Dai pannelli sono stati ricavati campioni per il TCT-test tramite taglio meccanico con sega diamantata raffreddata ad acqua e con dimensione 20 x 200 mm<sup>2</sup>. Sono stati testati quattro campioni per ogni set secondo le condizioni indicate nella sezione precedente.

Nel caso di spessori sottili (1.5 mm) il materiale ha raggiunto, in ogni caso, la tensione di rottura prima che la delaminazione avesse luogo. Tale condizione,

essendo stato raggiunto il livello di carico che ha causato il collasso catastrofico dei provini, non ha permesso di determinare lo stress critico asintotico  $\sigma_{\infty}$  e, di conseguenza, i valori critici di ERR per il *MODO II* secondo la relazione 3.1.

All'aumento dello spessore, e in particolare per i set con spessore da 3 mm e 4.5 mm, l'insorgenza della delaminazione e la sua propagazione è avvenuta in maniera asimmetrica come mostrato, a titolo di esempio, in Figura 13.

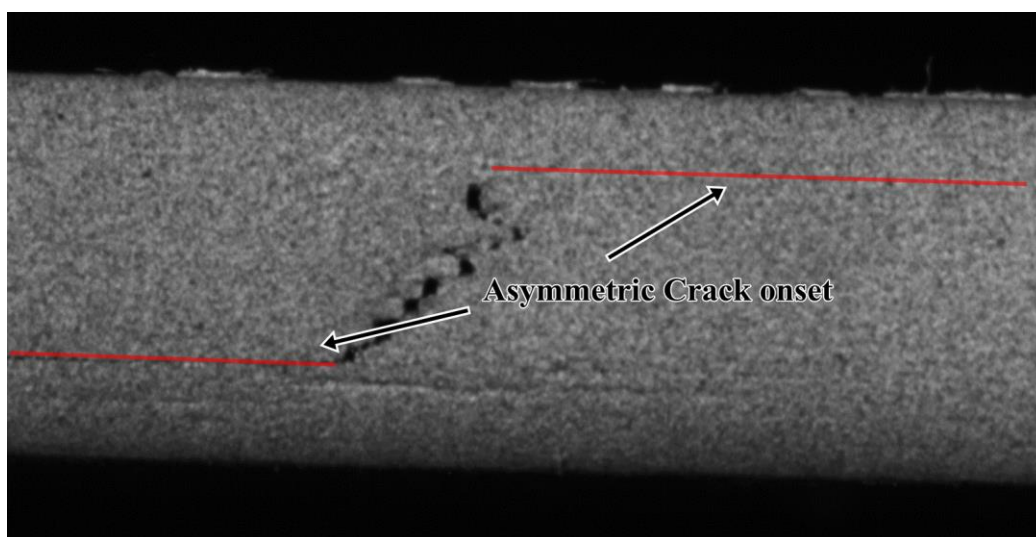


Figura 13 - Insorgenza della cricca in maniera asimmetrica

La seguente Figura 14 mostra una curva tipica carico-spostamento per un TCT-test. Come è possibile notare, l'innesco della delaminazione avviene a carichi nettamente inferiori rispetto al cedimento ultimo del campione (nel caso in figura, 14.9 kN). Nei casi in esame, non si sono individuate delle variazioni repentine di pendenza e, di conseguenza, non è stato possibile determinare in maniera univoca il carico di critico di delaminazione.

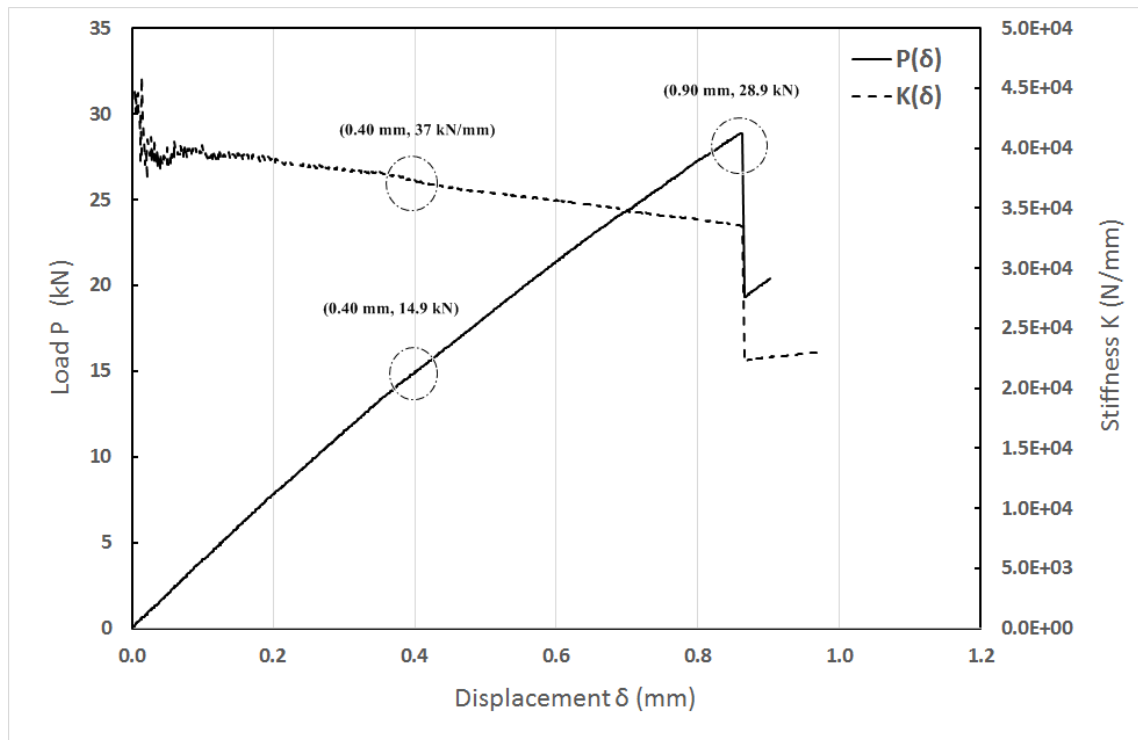


Figura 14 - Tipica Curva Carico-Spostamento per un TCT test

Tuttavia, la nascita di cricche asimmetriche, di fatto, rende inutili, al fine del calcolo dell'ERR, i dati sperimentali ottenuti poiché la 3.1 è valida solo per 4 cricche simmetriche e contemporanee.

La tabella seguente riassume, in termini qualitativi, i tipi di cedimento osservati per ogni campione testato nella campagna preliminare.



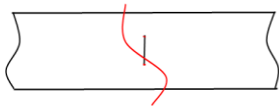
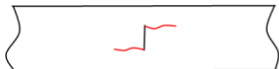
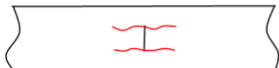
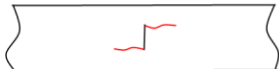
Sample ID	Spessore Totale [mm]	Spessore della Cricca [mm]	Modo di cedere
TCT_1_1	1.5	0.75	Premature failure of the sample 
TCT_1_2	1.5	0.75	
TCT_1_3	1.5	0.75	
TCT_1_4	1.5	0.75	
TCT_2_1	3.0	1.5	
TCT_2_2	3.0	1.5	
TCT_2_3	3.0	1.5	
TCT_2_4	3.0	1.5	
TCT_3_1	4.5	2.25	
TCT_3_2	4.5	2.25	
TCT_3_3	4.5	2.25	
TCT_3_4	4.5	2.25	

Tabella 3 - Risultati della campagna sperimentale

### 3.5 Geometria Alternativa per lo studio del *MODO II*

Per motivi che saranno chiari nelle sezioni seguenti della presente tesi, viene proposta una geometria alternativa per lo studio sperimentale e la determinazione dell'ERR per il *MODO II*.

Con lo stesso materiale utilizzato per i pannelli precedenti (tessuto pre-impregnato di carbonio unidirezionale con resina epossidica Hexcel IM7-8552), è stato preparato un pannello di spessore 4 mm (32 lamine) la cui porzione centrale è interessata da una cricca trasversale. A differenza della configurazione TCT presentata nelle sezioni precedenti, in corrispondenza dell'interfaccia tra le lamine tagliate e quelle integre, sono stati posti due porzioni di film distaccante (teflon) che si estendono solo in un verso rispetto alla cricca per 10 mm Figura 15a.

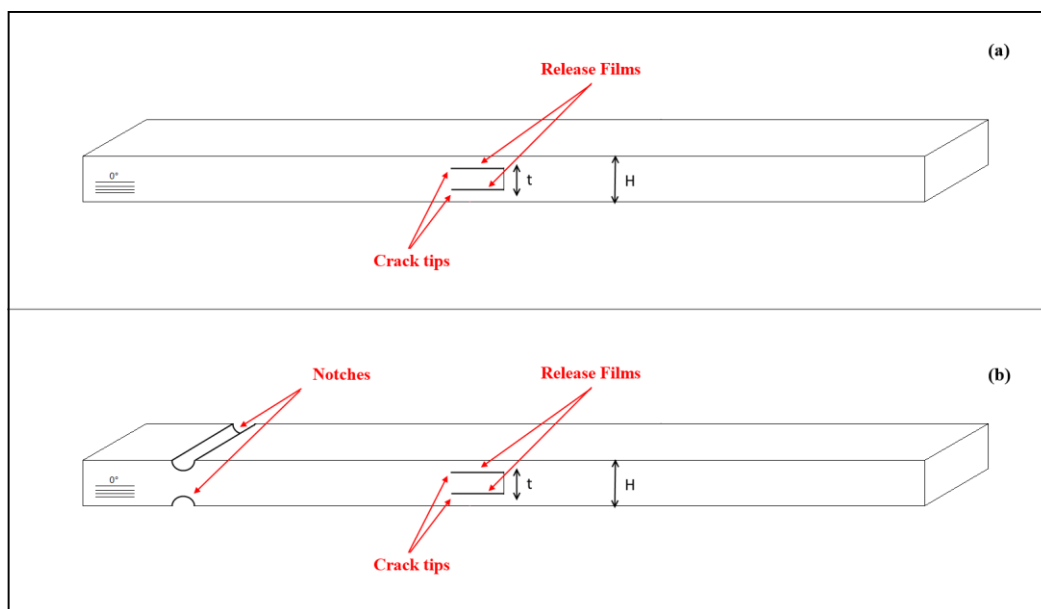


Figura 15 - Geometrie proposte

In una seconda versione della geometria proposta, sono stati praticati due intagli a profilo circolare in direzione della larghezza dei provini. Tali intagli sono stati praticati dallo stesso lato interessato dal film distaccante (rispetto alla cricca), su facce opposte, ad una distanza di 70 mm dai nuovi apici (Figura 15b) per una profondità pari allo spessore del singolo skin (lamine continue esterne). Tali intagli sono stati prodotti tramite micro fresatrice ad alta velocità e utensile diamantato.

In entrambi i casi il rapporto tra gli spessori è stato mantenuto pari a  $\phi_c = 0.5$ .

I campioni sono stati ricavati tramite taglio con sega circolare raffreddata ad acqua, equipaggiata con disco diamantato, con dimensioni 20 x 200 mm<sup>2</sup>. Tali campioni sono stati testati quasistaticamente secondo i parametri indicati nelle sezioni precedenti.



## 4 Metodi per l'Analisi Sperimentale e Numerica

Nella sezione seguente verranno presentate le tecniche sperimentali utilizzate al fine di compiere un'analisi approfondita del setup sperimentale. I risultati di tali analisi verranno presentati nei capitoli successivi.

### 4.1 Indagine Morfologica

Tra gli obiettivi che ci si è posti per lo sviluppo del seguente lavoro di tesi, vi è l'analisi approfondita dei setup sperimentali utilizzati attualmente per lo studio del comportamento a frattura secondo *MODO II*.

Al fine di comprendere e spiegare l'evoluzione dei fenomeni durante il test, si è reso necessario programmare una serie di indagini morfologiche che meglio hanno messo in luce la reale geometria (se pur a scala mesoscopica) e l'effetto della delaminazione sulle superfici di frattura.

L'analisi per immagini si è in particolare divisa in due momenti:





- Studio dell'area prossima alla cricca trasversale dei provini non ancora testati
- Studio delle superfici di frattura

La reale geometria della cricca trasversale è stata osservata mesoscopicamente tramite fotografia digitale con obiettivi macro. In particolare, la cricca trasversale è stata fotografata tramite macchina fotografica digitale SLR-Camera con sensore da 24.1 MPixel, equipaggiata con obiettivo Macro con lunghezza focale di 60 mm. Per garantire buoni livelli di contrasto ed ottenere immagini dettagliate, il campo di vista è stato illuminato tramite fari led. Tuttavia, nonostante tale tecnica abbia rilevato importanti aspetti del problema grazie anche alle elevate risoluzioni ed ingrandimenti, limita l'osservazione alle superfici esterne.

La tomografia computerizzata a raggi X è una tecnica non distruttiva che sfrutta i fenomeni di interazione tra la materia e le radiazioni con lunghezze d'onda comprese tra 10 nm e 1pm per la ricostruzione, tramite algoritmi computerizzati, tridimensionale dell'oggetto esaminato e del suo intero volume.

Attraverso tale tecnica è possibile superare l'inconveniente della sovrapposizione dei piani di proiezione tipica della radiografia X. Durante la scansione, infatti, la fonte radiogena (e di conseguenza anche i sensori di acquisizione) ruota relativamente al campione in modo da ottenere immagini a step costanti fino ad almeno 180° (Figura 16). La triangolazione tramite post processing delle informazioni presenti nelle immagini acquisite, permette di ricavare delle immagini trasversali che del campione, senza sovrapposizione, che possono, infine, essere ricostruite a formare un solido.

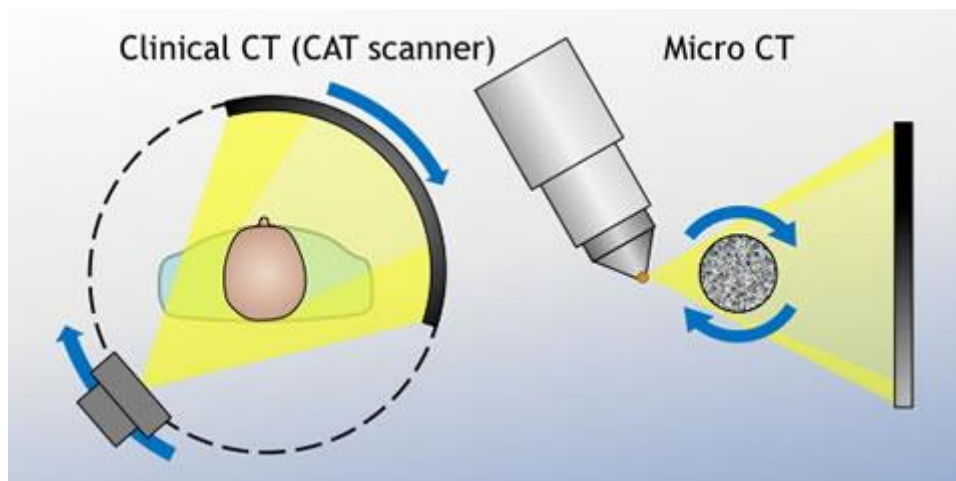


Figura 16 - Scansione angolare per la tomografia computerizzata

La tomografia computerizzata è stata eseguita tramite micro-ct scanner Bruker, High-resolution micro-CT, SKYSCAN 1272 con rotazione di 360°. Sono state fatte 7 scansioni per ogni rotazione da 0.4° in modo da diminuire il rumore e migliorare la qualità delle immagini. Il voltaggio è stato settato a 60kV e 166  $\mu$ A con un filtro per le componenti molli in alluminio da 0.25 mm di spessore. Tali parametri hanno garantito i giusti livelli di contrasto e hanno permesso la corretta esecuzione delle procedure di post processing e l'ottenimento delle immagini desiderate. Le scansioni sono state eseguite su porzioni estratte da campioni integri.

A valle dei test meccanici, le superfici interessate delle delaminazioni sono state estratte meccanicamente tramite taglio con sega diamantata avendo cura di non danneggiare le zone di interesse. Le porzioni sono state osservate al microscopio a scansione elettronica (SEM).

La microscopia a scansione elettronica è una tecnica che sfrutta un fascio di elettroni primari focalizzati che interferiscono con la materia emettendo particelle derivate (elettroni secondari) che vengono rilevati da un sensore di acquisizione. Il fascio di elettroni primario spazza alternativamente porzioni rettangolari per righe



inviando, quasi in tempo reale, i dati al calcolatore che provvede a generare immagini in bianco e nero ad altissima risoluzione (fino ad 1 nm/pixel) e con possibilità di ottenere ingrandimenti fino a 300000x.

Nel caso in esame, le scansioni sono state fatte a 15 kV tramite scanner SEM Phenom World modello Phenom Pro X.

## 4.2 Digital Image Correlation

La Digital Image Correlation (DIC) è una tecnica di indagine non distruttiva (NDT) e non a contatto per la valutazione, a campo intero, degli spostamenti e delle deformazioni a cui è soggetto un corpo sotto l'azione di carichi esterni. Di seguito, per la spiegazione dei principi che governano la DIC, si farà riferimento alla 2D-DIC, che, con l'utilizzo di una singola fotocamera, permette di tracciare spostamenti e deformazioni nel piano. È possibile effettuare l'analisi tridimensionale utilizzando 2 fotocamere sincronizzate sfruttando le tecniche di stereoscopia.

Entrando nel merito della tecnica, il bisogno di descrivere l'evoluzione del campo degli spostamenti nel tempo, presuppone la necessità di acquisizione istantanea dei dati per ogni condizione di carico di interesse. Gli elementi di input per l'analisi sono costituiti da un set di immagini digitali monocromatiche ad alta risoluzione. Le immagini corrispondenti alle varie configurazioni deformate vengono confrontate con un'immagine di riferimento e gli spostamenti vengono, così, calcolati. La valutazione delle distorsioni viene fatta assumendo che essa sia legata alla variazione, in termini di scala di grigio, del livello di ogni pixel o set di pixel [19]. Nell'ipotesi di deformazioni omogenee, è possibile legare gli

spostamenti alle funzioni associate, rispettivamente, al livello di scala di grigio dell'immagine di riferimento  $f(x, y)$  e alla medesima di una immagine dello stato deformato  $f^*(x^*, y^*)$  secondo la relazione seguente.

$$f^*(x^*, y^*) - f(x + u(x, y) + v(x, y)) = 0 \quad 4.1$$

dove  $u(x, y)$  e  $v(x, y)$  sono gli spostamenti nella regione considerata [20][21].

Affinché tale tecnica risulti precisa, il sensore digitale deve essere posto parallelamente alla superficie da analizzare in modo che i movimenti fuori dal piano possano essere trascurati. Le immagini devono essere nitide e ben contrastate. Per ottenere tali risultati, sono stati utilizzati cavalletti per il puntamento e illuminatori led a luce bianca per garantire un contrasto ottimale.

In fase di analisi è necessario correlare delle aree corrispondenti nell'immagine di riferimento e nelle immagini della configurazione deformata. In altri termini, lo stesso livello di grigio considerato nell'immagine di riferimento (che individua un'area precisa) deve essere univocamente individuato nelle immagini successive. Appare dunque evidente che le aree non possono limitarsi alla grandezza di un singolo pixel ma devono considerare un numero adeguato a garantire l'esatta correlazione. Tali gruppi di pixel vengono solitamente chiamati *subset* e costituiscono un vero e proprio sistema di discretizzazione dell'immagine. Gli spostamenti vengono calcolati nei punti di intersezione di tali *subset* e rispetto al punto centrale dei *subset* stessi (Figura 17).

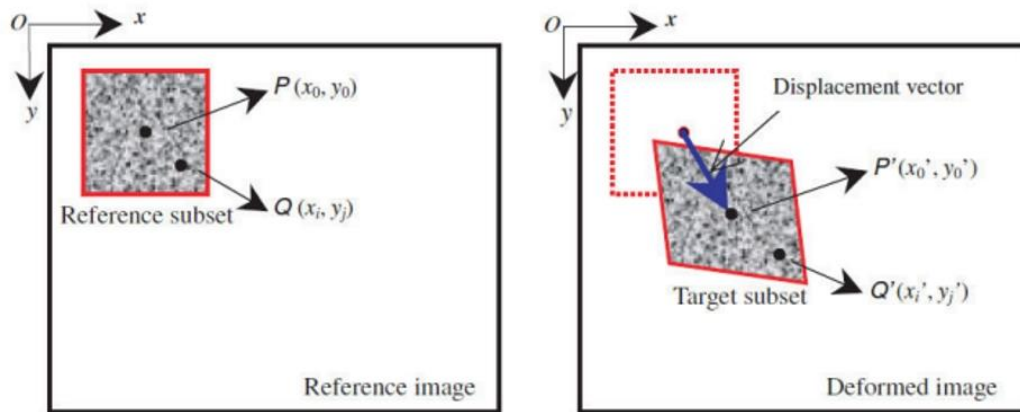


Figura 17 - Calcolo degli spostamenti per la DIC

Per garantire l'univocità della distribuzione di livelli di pixel in una certa area, nonché per aumentare i livelli di contrasto, è stato dipinto sulle superfici da analizzare uno *speckle*, ovvero una distribuzione di punti neri su una superficie bianca, tramite aerografo. Il risultato di tale operazione è riportato, a titolo di esempio, in Figura 18 (ingrandimento di un'immagine acquisita in fase di sperimentazione).

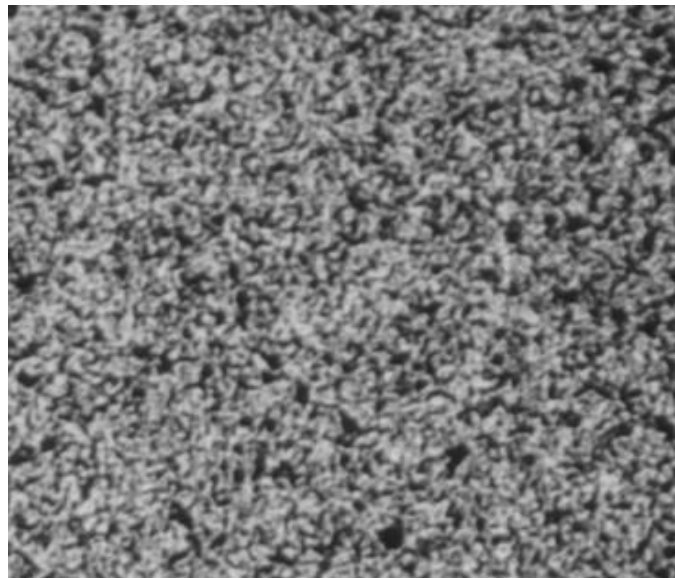


Figura 18 - Speckle Pattern

In termini numerici, al fine di correlare *subsets* corrispondenti in immagini diverse, vengono utilizzati i criteri di corrispondenza. Tali criteri sono classificati in due principali famiglie: (I) *criteri cross-correlation* e (II) criteri basati sulle somme delle differenze quadrate (*sum-squared differences*). Per sinteticità non verranno riportati tutti i criteri poiché esula dagli scopi ultimi del presente lavoro di tesi. Tuttavia tali criteri sono ampiamente discussi in letteratura [22][23][24]. Inoltre, Blaber *et al.* [25] forniscono un'ampia descrizione dell'algoritmo che sta alla base del codice Matlab<sup>®</sup> utilizzato nella presente campagna sperimentale.

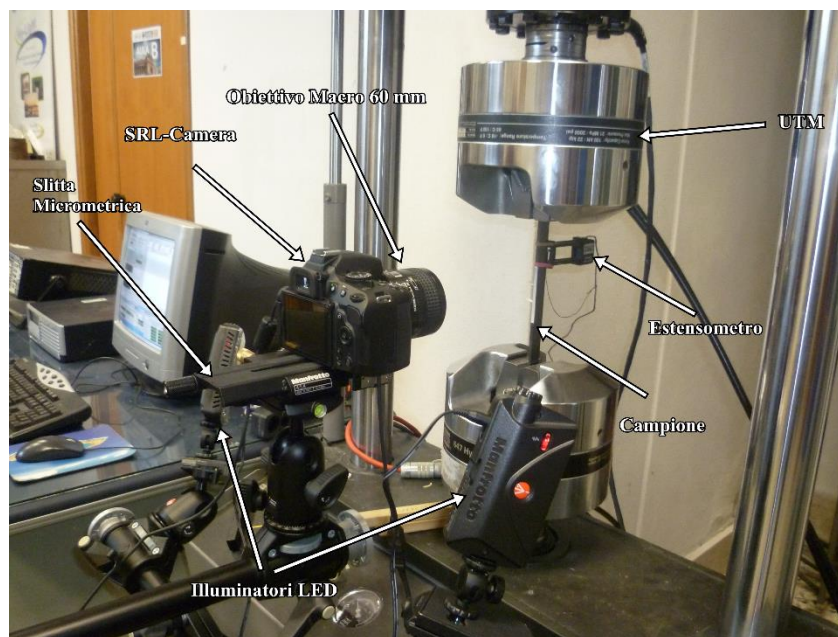


Figura 19 - Setup sperimentale Per le acquisizioni DIC

Nel caso specifico, l'analisi DIC bidimensionale è stata applicata utilizzando un sistema *in-house* accoppiato ad un tool open source in linguaggio Matlab<sup>®</sup> (Ncorr [26]) ed è stato utilizzato un software per il controllo della macchina fotografica via computer. Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata una macchina fotografica SLR equipaggiata con obiettivo macro a focale fissa di 60 mm. Al fine di migliorare le condizioni di nitidezza e contrasto, il campo di prova è stato



illuminato, tramite appositi illuminatori, con luce led continua (Figura 19). Nella tabella seguente è fornito un elenco dettagliato delle caratteristiche del setup utilizzato.

Il setup sperimentale è stato interamente messo a punto e ottimizzato durante il periodo di dottorato.

Le acquisizioni sono state fatte durante l'esecuzione delle prove quasistatiche e le immagini sono state messe in relazione alle curve carico spostamento ottenute dalla macchina descritta nelle sezioni precedenti.

<b>Camera type</b>	Single-lens digital reflex
<b>Image sensor</b>	23.5 x 15.6 mm CMOS
<b>Effective Pixel</b>	24.1 MPixel
<b>Focal Lenght</b>	60mm - macro
<b>Sampling Rate</b>	0.5 Hz
<b>Resultant resolution</b>	20 $\mu\text{m}/\text{mm}$
<b>Subset Radius</b>	20 pixel
<b>Subset Overlapping</b>	5 pixel
<b>Loading rate</b>	10 kN/min

*Tabella 4 - Parametri e caratteristiche tecniche del setup utilizzato per l'acquisizione dei dati per l'analisi DIC*

#### 4.3 Thermoelastic Stress analysis

L'analisi termoelastica degli stress (TSA) è una tecnica di indagine sperimentale che fornisce informazioni sull'evoluzione degli stress in funzione dei cambiamenti di temperatura. Le relazioni tra queste quantità sono riconducibili all'effetto termoelastico secondo il quale ad un cambiamento di volume del corpo sottoposto



a deformazione elastica corrisponde una variazione di temperatura reversibile [27][28]. Tale variazione di temperatura è esprimibile, nel caso di materiale ortotropo, secondo la seguente legge lineare di governo del fenomeno

$$\Delta T = -\frac{T_o}{\tilde{\rho}C_p}(\alpha_1\Delta\sigma_1 + \alpha_3\Delta\sigma_3) \quad 4.2$$

dove i pedici 1 e 3 indicano le direzioni principali del materiale tenuto conto del sistema di riferimento adottato,  $\Delta T$  è la variazione di temperatura indotta dal set di carichi,  $T_o$  è la temperatura assoluta del campione,  $\tilde{\rho}$  e  $C_p$  sono rispettivamente la densità del materiale considerato omogeneo e il suo valore specifico,  $\alpha_{1,3}$  sono i coefficienti di espansione termica del materiale nelle sue direzioni principali e  $\sigma_{1,3}$  sono le componenti principali dello stress [29][30].

Generalmente, in questo tipo di analisi, il campione è sottoposto a carichi ciclici in regime sinusoidale. Questa condizione permette di eseguire il test su un sistema che si comporta adiabaticamente il che è un requisito necessario per poter applicare la 4.2 [27]. Inoltre, il regime sinusoidale permette di modulare il segnale termoelastico alla frequenza di carico. In tal modo risulta possibile filtrare il segnale (*Lock-in filtering* nel caso specifico del seguente lavoro) e disaccoppiare la componente termoelastica di  $\Delta T$  da variazioni spurie di temperatura.

Per rendere più agevole la comprensione della tecnica e la lettura dei risultati, risulta necessario esporre alcune considerazioni specifiche. La *Lock-in filtering* applicata nel caso del presente lavoro scientifico, è una procedura che permette di valutare la fase e l'ampiezza del segnale termoelastico [19][31]. La conoscenza di tali parametri permette di descrivere il segnale termoelastico tramite funzione trigonometrica come segue:



$$S = \tilde{A} \cos(\omega t + \varphi) \quad 4.3$$

essendo:

$$\tilde{A} = |\Delta T| \quad 4.4$$

$$\varphi = \begin{cases} \beta + 0^\circ & \text{if } (\alpha_1 \Delta \sigma_1 + \alpha_3 \Delta \sigma_3) < 0 \\ \beta + 180^\circ & \text{if } (\alpha_1 \Delta \sigma_1 + \alpha_3 \Delta \sigma_3) > 0 \end{cases} \quad 4.5$$

dove  $\alpha$  è il generico angolo di sfasamento tra il carico sinusoidale e la fase della funzione di campionamento delle temperatura. Tale valore costituisce un'errore facilmente superabile utilizzando sistemi di sincronizzazione o operando un'operazione di shifting in fase di post-processing. Ciò che si evince dalle 4.5 è che, in condizioni adiabatiche, la fase  $\varphi$  può assumere solo due valori che differiscono per  $180^\circ$  corrispondenti a due valori del termine tra parentesi nella 4.2,  $(\alpha_1 \Delta \sigma_1 + \alpha_3 \Delta \sigma_3)$ , uguali in modulo ma con segni opposti.

Nel caso dei campioni in configurazione TCT in materiale composito rinforzato (fibra di carbonio e resina epossidica) oggetto dell'analisi presentata in questo lavoro di tesi, sono previsti due differenti scenari. Nella zona lontana dalla cricca, lo stress è prevalentemente uniassiale per cui si trova che  $\sigma_1 \neq 0$  mentre  $\sigma_3 = \tau_{13} = 0$  con un livello di segnale termoelastico basso dovuto al valore di  $\alpha_1$  prossimo allo zero [29]. Vicino alla cricca trasversale, ciò che ci si aspetta, nel caso di stato tensionale di puro taglio è che  $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$  e  $\tau_{13} \neq 0$ . In tale evenienza, il segnale termoelastico deve essere nullo. Considerando, inoltre, che  $\alpha_1$  è tipicamente più basso di del corrispettivo in direzione trasversale di circa un ordine di grandezza in valore assoluto, si è previsto che l'allontanamento dal puro stato di taglio deve essere messo in evidenza dalla tecnica utilizzata. Infatti, tale variazione dallo stato ideale deve essere dovuta all'insorgere di un effetto trasversale e più



specificatamente da  $\sigma_3$ . Tale componente è amplificata, secondo la relazione 4.2 dal coefficiente di espansione termica e incrementerebbe la qualità del segnale termoelastico. Inoltre, essendo  $\alpha_3 \Delta \sigma_3 > |\alpha_1 \Delta \sigma_1|$ , nel caso in cui nascesse una component positiva di  $\sigma_3$ , si osserverebbe un cambiamento di fase pari a  $180^\circ$

Secondo quanto appena esposto, possono essere fatte delle stime a proposito della fase e del segno delle tensioni. Tenendo conto della 4.5 la mappa di fase dovrebbe presentarsi in maniera uniforme con un valore pari ad  $\alpha$  con un'oscillazione di  $180^\circ$  e la variazione di temperatura deve essere in fase con il carico: quando il livello di carico sale, sale anche la temperatura e viceversa.

Nel presente lavoro sperimentale, i provini sono stati caricati ciclicamente tramite UTM servoifraulica MTS-80 controllata in remoto da software MTS Flextest tramite il quale è possibile impostare i parametri di carico. Sono stati testati campioni a tre diverse ampiezze (1-9 kN, 1-11 kN e 1-17 kN) e tre diverse frequenze (2 Hz, 4 Hz e 6 Hz). La temperatura del campione è stata misurata tramite telecamera ad infrarossi FLIR X6540sc raffreddata a matrice di sensori da  $640 \times 512$  pixels con risoluzione termica di 18mK (Figura 20). È stato utilizzato un obiettivo con lente a focale fissa da 50mm e apertura massima f/2 accoppiato ad extension ring da 12 mm con risoluzione ottenuta pari a circa  $70 \mu\text{m}/\text{pixel}$ .



*Figura 20 - Termocamera*

La variazione di temperatura alla frequenza di carico è ottenuta parallelamente tramite due procedure in Lock-in equivalenti per verificare la bontà dei dati: (I) software THESA fornito a corredo della termocamera utilizzata e (II) un codice in-house in linguaggio Matlab<sup>®</sup> basato sulla trasformata di Fourier [31]. I termogrammi sono stati acquisiti con una frequenza di 64 Hz per 32 sec con un tempo di integrazione del sensore della camera pari a 1760  $\mu$ sec. Ogni campione è stato dipinto precedentemente con vernice nera opaca per ottimizzare l'emissività e riprodurre il comportamento da corpo nero.

Sono state valutate inoltre le mappe relative alla seconda armonica (doppio della frequenza di carico) ottenendo, così, informazioni sui fenomeni dissipativi come proposto in letteratura [32][33][34]. Anche in questo caso, le analisi sono state fatte parallelamente con i due metodi presentati prima per confermare l'affidabilità dei metodi utilizzati.

#### 4.4 Modello numerico

Al fine di estendere i risultati ottenuti a geometrie diverse, in termini di spessori, utilizzando le tecniche presentate nel secondo capitolo, sono state eseguite delle analisi agli elementi finiti (FEM). A questo scopo è stato creato un modello parametrico in linguaggio Python da importare come input nel software commerciale Abaqus [35]. Nel caso del TCT-test, è stato modellato ed analizzato un quarto del provino introducendo le opportune condizioni di simmetria (Figura 21).

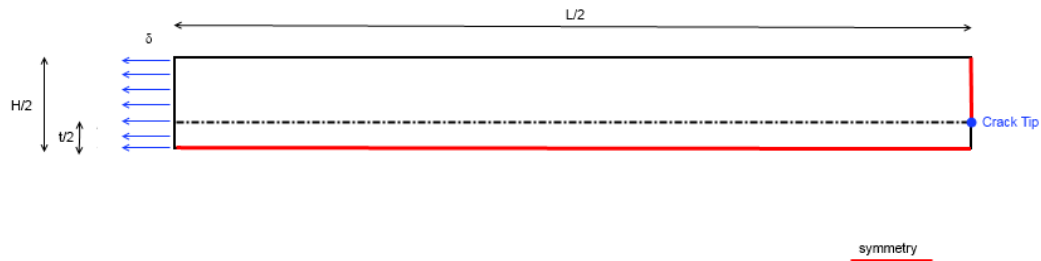


Figura 21 - Modello FEM per il TCT-test

Sono stati utilizzati elementi quadratici a quattro nodi con integrazione ridotta, CPS4R ed è stato calcolato il grado di mode mixity come segue:

$$\psi = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \quad 4.6$$

dove  $G_I$  e  $G_{II}$  sono rispettivamente gli energy release rate associati al *MODO I* e *MODO II* e calcolati applicando la Virtual Crack Closure Technique (VCCT) presentata nelle sezioni precedenti. Per applicare questa tecnica, deve essere considerata una precricca la cui lunghezza è stata fatta variare nel modello parametrico con  $\alpha$ , rapporto tra la lunghezza di cricca e lo spessore del campione



(tra 0.025 e 0.825). Per validare lo script in linguaggio Python è stata utilizzata la funzione built-in di Abaqus per il calcolo del J-integral e i valori sono stati confrontati con quelli ottenuti dalla VCCT.

È sono state lanciate delle analisi imponendo uno spostamento e la forza  $P$  è stata calcolata come somma delle reazioni vincolari ai nodi.

La variazione parametrica è data dalla diversificazione dei valori assunti dai dati di input nell'analisi. In particolare, tale variazione ha interessato  $\lambda$  e  $\rho$  definiti nella sezione 2.4,  $\alpha$ , rapporto tra la lunghezza di cricca e lo spessore del campione per un totale di circa 1500 combinazioni diverse corrispondenti ad altrettante simulazioni.

In maniera similare, simulazioni sono state eseguite prendendo in considerazione la nuova geometria proposta. Considerando i piani di simmetria, per ottimizzare i tempi di calcolo e le risorse computazionali, è stato analizzato il modello riportato in Figura 22.

In questo caso i parametri sono stati definiti come segue

- $\chi$  definito come il rapporto tra la distanza orizzontale del centro del notch circolare dai crack tips;
- $\alpha^*$  definito come il rapporto tra la lunghezza della cricca a partire dal crack tip e lo spessore moltiplicato per l'inverso di  $\chi$ ;

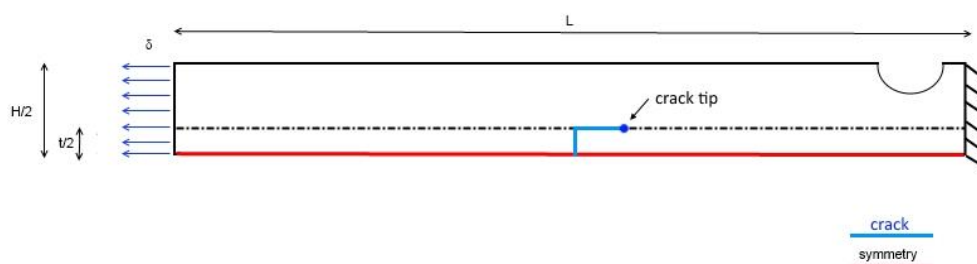


Figura 22 - Schematizzazione del modello analizzato per la nuova configurazione proposta

Per tali analisi numeriche è stato utilizzato un modello parametrico equivalente a quello appena presentato. La variazione ha inoltre interessato la posizione e le dimensioni del notch.



ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA  
TENACITÀ A FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



## 5 Discussione dei Risultati sperimentali per il TCT-test

Nel presente capitolo di tesi di Dottorato, verranno presentati e discussi i risultati delle analisi sperimentali condotte sul setup classico del TCT-test. Prendendo spunto dalle osservazioni che verranno discusse al seguito, verrà proposta una configurazione alternativa di semplice realizzazione e utilizzo per l'esecuzione dei test di caratterizzazione della tenacità a frattura a *MODO II* dei materiali.

### 5.1 TCT-test: Morfologia della cricca

Per mettere in evidenza la reale geometria della cricca, sono state effettuate delle indagini macrografiche su scala mesoscopica e scansioni a raggi X per l'analisi micro-tomografica computerizzata. In Figura 23 sono presentate le immagini macrografiche.



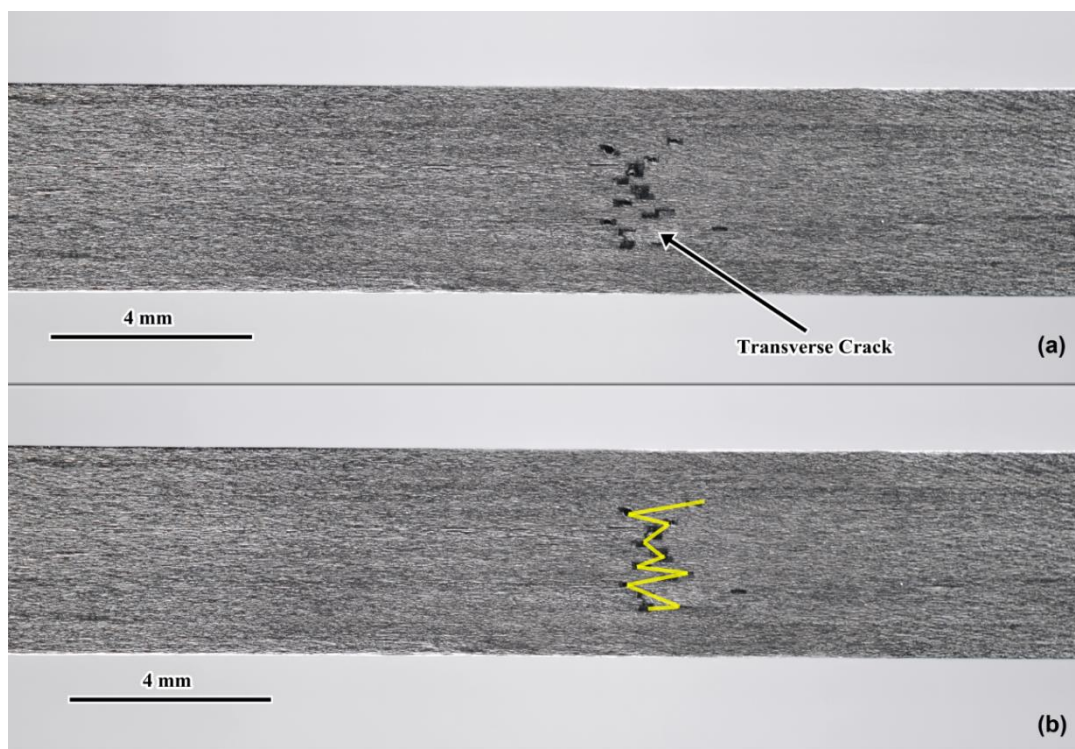


Figura 23 - Macrografia della zona vicina alla cricca per un provino TCT

Nonostante tale tecnica non richieda particolari attrezzature, ha fornito importanti informazioni utili a spiegare alcuni fenomeni rilevati durante le analisi presentate di seguito.

La tecnica utilizzata per produrre i campioni oggetto della campagna sperimentale presentata in questo lavoro di tesi di Dottorato permette di ottenere dei campioni di ottima qualità poiché garantisce omogeneità e una quantità di difetti trascurabile. Tuttavia, come è possibile osservare dalla Figura 23a, la reale geometria della cricca si discosta da quella prevista dal modello teorico poiché risulta non essere rettilinea e i requisiti di simmetria non sono assicurati. La cricca trasversale si presenta irregolare attraverso lo spessore (Figura 23b) ed è possibile individuare delle zone di sovrapposizione tra lamine adiacenti in corrispondenza dei ply-drop-off alternati a vuoti e accumuli di resina.

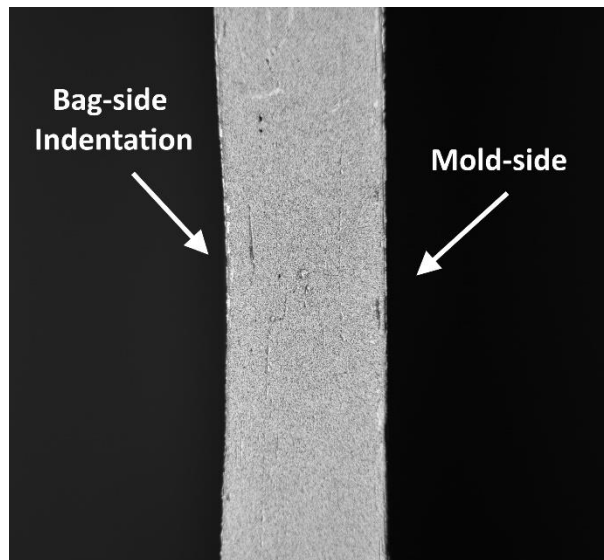


Figura 24 - Campione realizzato con tecnica Resin-infusion

L'utilizzo di tecniche di manifattura più economiche e diffuse e che prevedono l'utilizzo di sacchi da vuoto ha prodotto campioni con difetti e asimmetrie più evidenti (Figura 24). In particolare, la zona più cedevole agli effetti della depressione, in corrispondenza della cricca trasversale, è stata interessata da segni di indentazione degli strati superiori (sacco da vuoto, peel-ply e infusion-mesh) rendendo la zona di interesse fortemente asimmetrica. Inoltre, come noto, i compositi prodotti utilizzando tali processi sono affetti dalla presenza di difetti e vuoti dovuti, ad esempio, all'architettura propria del tessuto di rinforzo o alla forte influenza della manualità dell'operatore sul risultato finale.

I campioni mostrati in Figura 23, sono stati analizzati tramite micro-CT.

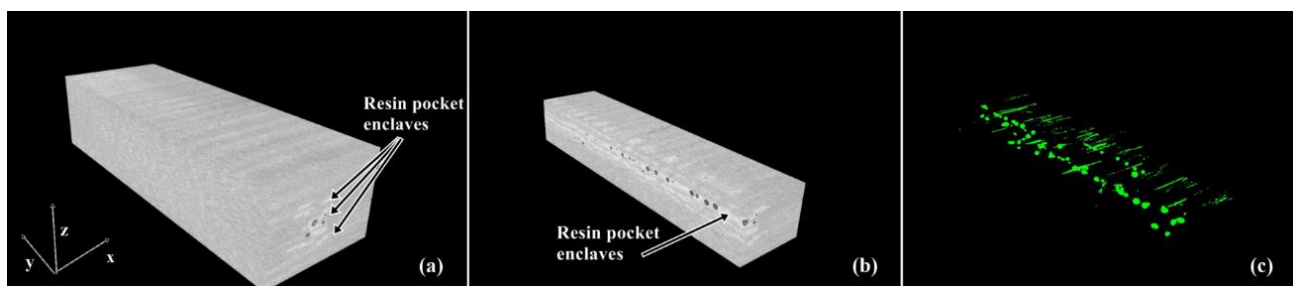
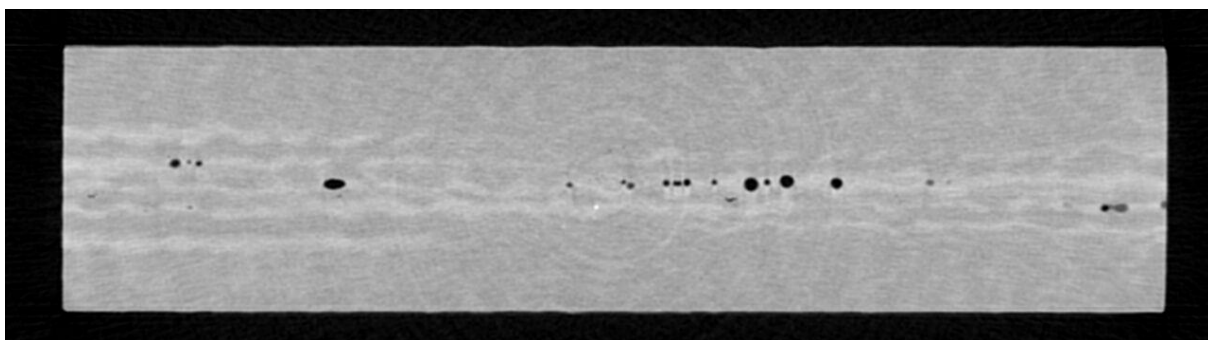


Figura 25 - Micro-CT della zona della cricca per un provino per TCT-test

La Figura 25a mostra la ricostruzione tridimensionale del campione scansionato. In tale immagine è ben visibile la presenza di una zona ricca di resina e non interessata dal rinforzo corrispondente alla cricca trasversale. Come è possibile osservare nella sezione mostrata in Figura 25b, tale condizione si estende per tutta l'area della cricca. Inoltre, la sezione ha rivelato la presenza di vuoti in corrispondenza delle ply-drop-off dovuti al fluire della resina durante il processo di cura sotto pressione. La Figura 25c mostra la distribuzione di difetti nell'area della cricca trasversale. È possibile notare la presenza di difetti a bolla descritti sopra (vuoti) e difetti allungati. Questi ultimi sono probabilmente dovuti all'azione meccanica della pressa durante il processo di cura che induce alla separazione delle fibre nei tessuti pre-impregnati quando ancora la resina si trova allo stato fluido.

È importante mettere in evidenza il carattere random della distribuzione, delle forme e delle dimensioni di tali difetti poiché la presenza degli stessi possono essere motivo di scattering nei risultati dei test meccanici.

Infine, per completezza, in Figura 26 è mostrata una singola sezione ricavata dall'a tomografia computerizzata (slice) dove sono ben visibili i vuoti presenti nella zona della cricca.



*Figura 26 - Micro-CT Slice*

## 5.2 TCT-test: Test quasistatici e Digital Image correlation

I campioni in configurazione TCT sono stati testati in controllo di forza o di spostamento secondo le necessità, con un rateo di carico pari a 10 kN/min e in Figura 27 è riportata una tipica curva forza-spostamento e rigidezza apparente-spostamento.

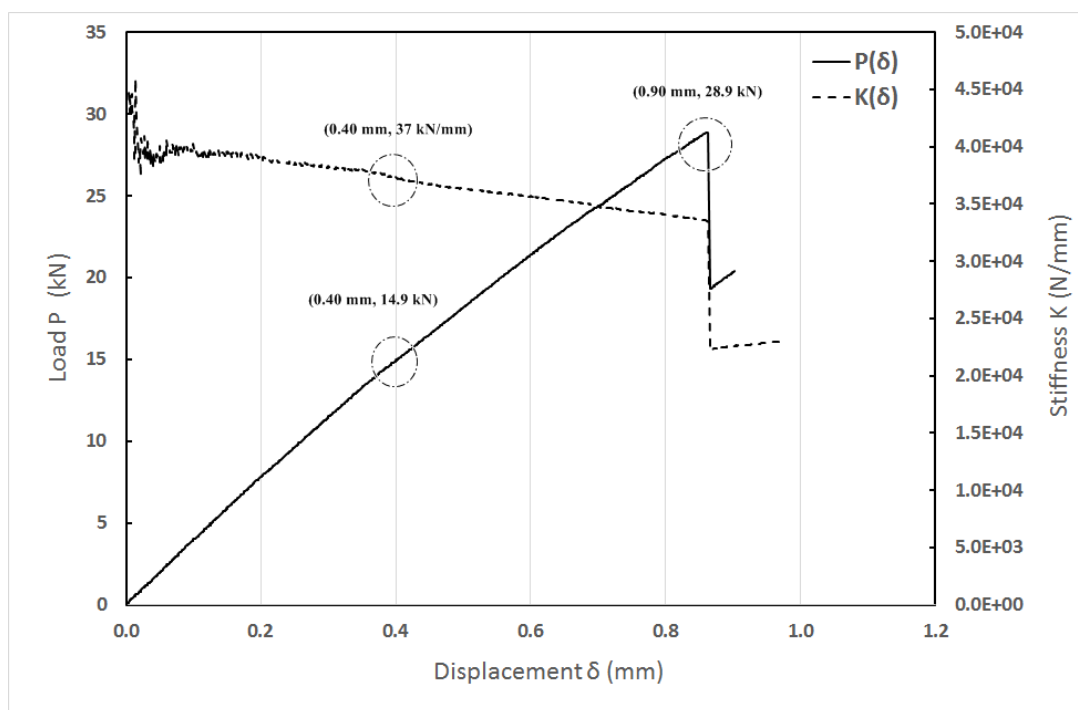


Figura 27 - Curva tipica Carico-Spostamento e Rigidezza spostamento per un provino in configurazione TCT

Per il provino in esame, è possibile notare che la curva presenta un comportamento assimilabile a lineare con una leggera variazione di pendenza in corrispondenza ad un carico pari a circa 14.9 kN. Tale variazione può essere attribuita ad un primo fenomeno di nucleazione e propagazione della cricca. Tuttavia, il valore esatto del carico relativo al primo evento non è univocamente determinabile a partire dalla curva proposta e, quindi, si introduce un'incertezza sul calcolo del valore dall'ERR a *MODO II* secondo la formula 3.1 presentata in sezione 3.2.

Durante i test quasistatici sono state acquisite dei fotogrammi delle configurazioni deformate nell'intorno della cricca, al variare del carico, previa stesura di uno speckle nero con distribuzione random su sfondo bianco.

Grazie all'analisi DIC è stato possibile valutare l'evoluzione del primo evento ed è stato osservato che, per tutti i provini testati, la prima nucleazione e la relativa propagazione della cricca è avvenuta in maniera asimmetrica. Con tale evenienza, pur approssimando il valore di carico a cui avviene la delaminazione, tale dato non è spendibile ai fini del calcolo dell'ERR poiché la 3.1 è valida solo nel caso di propagazione simmetrica e contemporanea di quattro cricche in versi a due a due opposti secondo il modello analitico per la configurazione TCT.

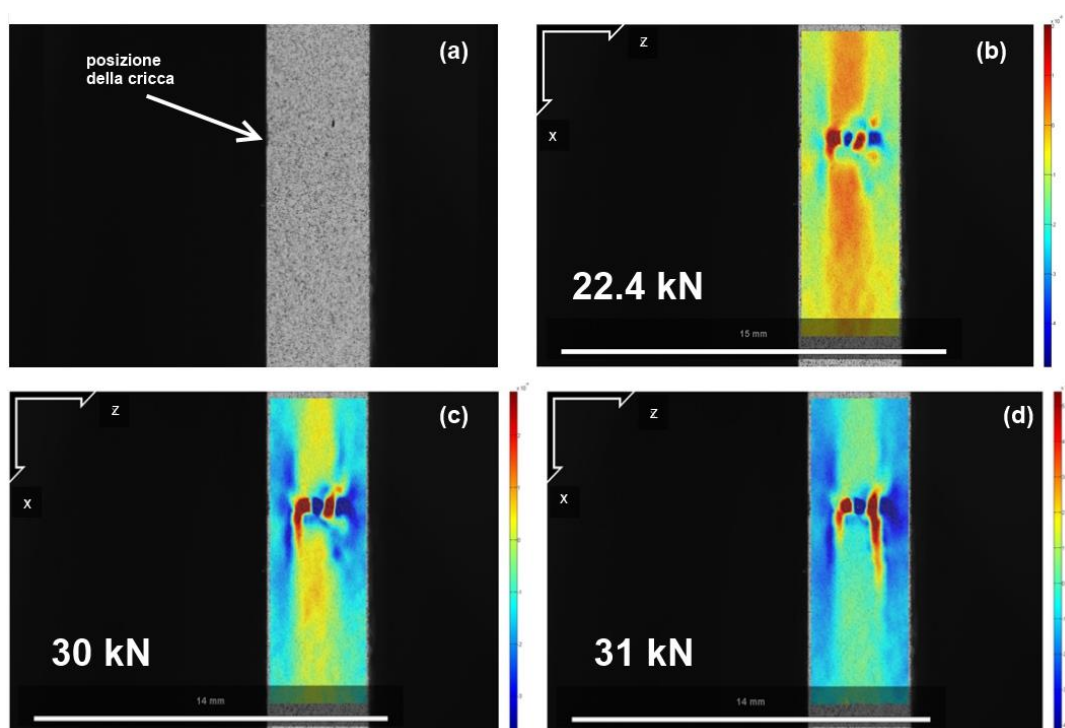


Figura 28 – Mappe delle deformazioni  $\epsilon_{zz}$  lungo la direzione dello spessore

In Figura 28 sono riportate delle mappe del campo di deformazione in direzione dello spessore per un provino TCT in cui è ben visibile il comportamento appena descritto. In Figura 28a, in particolare, è mostrato il provino in configurazione non



deformata a carico nullo su cui è possibile notare lo speckle ed è indicata, approssimativamente, la posizione della cricca. In Figura 28b è riportato il campo delle deformazioni ad un livello di carico relativamente basso e pari a 22.4 kN. Analizzando tale mappa si evidenzia la presenza di una zona a deformazioni negative (in blu scuro), in corrispondenza del centro della cricca, circondata da un'area sottoposte a deformazioni positive. Questo distribuzione suggerisce la presenza di uno scenario tipico del Mixed-Mode. Come introdotto precedentemente, inoltre, dalle Figura 28c e Figura 28d, è possibile notare qual è la reale evoluzione della delaminazione. Si osserva, inizialmente (24.4 kN, 30 kN), una propagazione a partire da un singolo apice di cricca e in un solo verso (è evidente la concentrazione di deformazioni in rosso). Tale propagazione rende il provino asimmetrico con conseguente nascita effetti spuri quali rotazioni e momenti che rendono il cedimento a modo misto. Per carichi più alti, (31.1 kN) si osserva la nascita di un'ulteriore cricca non simmetrica. Nonostante la DIC permetta di mettere in relazione un valore di carico al primo cedimento, il comportamento del provino non permette di calcolare il rateo di rilascio energetico a *MODO II*.

Per completezza vengono riportati in Figura 29 e Figura 30, rispettivamente, i campi di deformazione da taglio e longitudinali ad un livello di carico pari a 31.1 kN.



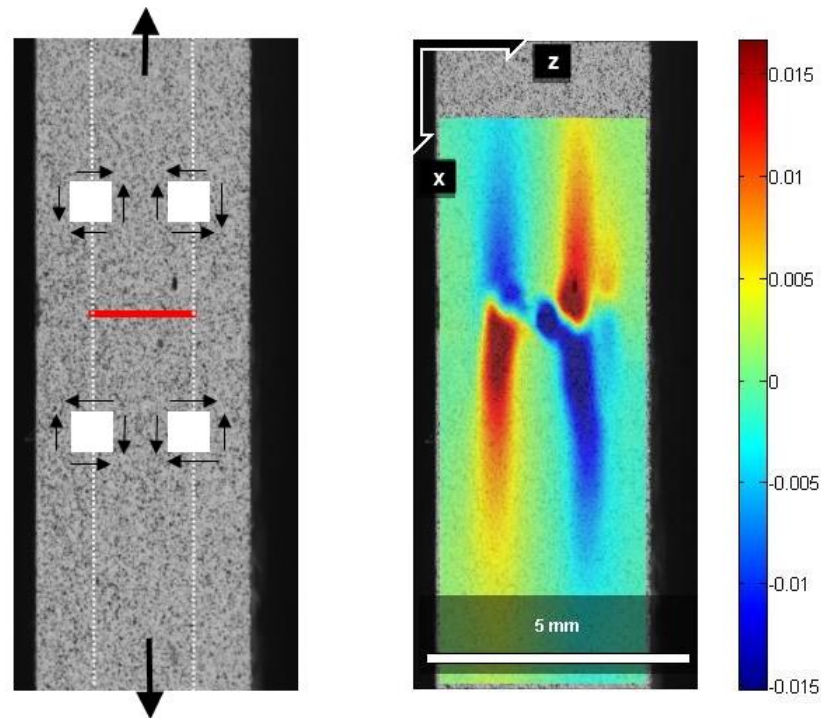
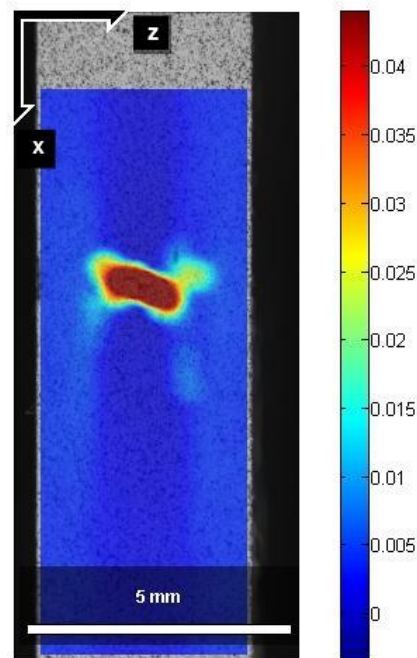


Figura 29 - Campo delle deformazioni dovute al taglio  $\tau_{yx}$

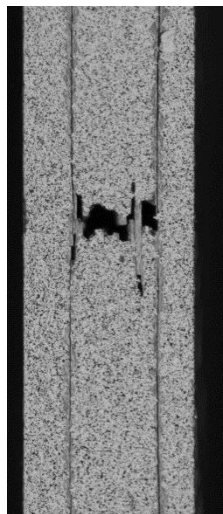
La particolare distribuzione di deformazioni mostrata in Figura 29 con la caratteristica forma a farfalla con inversione di segno nelle quattro posizioni antisimmetriche rispetto alla cricca, è dovuta, essenzialmente, alla convenzione utilizzata e al sistema di riferimento.

In Figura 30 è mostrato il campo delle deformazioni lungo la direzione delle fibre. E' possibile notare un'ampia zona di concentrazioni di deformazioni. Tale area corrisponde ad una zona più cedevole costituita dal pacchetto di resina osservato nell'indagine macrografica e tomografica e descritto in sezione 5.1.



*Figura 30 - Campo delle deformazioni in direzione longitudinale  $\varepsilon_{xx}$*

In fine, in Figura 31 è presentata una immagine del campione una volta avvenuto il cedimento catastrofico. Sono ben visibili le zone delaminate e la forma irregolare della cricca trasversale



*Figura 31 - Campione completamente delaminato ad un livello di carico pari a circa 33 kN*





I risultati sperimentali a cui si è giunti con tale tecnica mostrano che il test, nella configurazione presentata, non è come robusto. Inoltre, la distribuzione delle deformazioni suggerisce uno scenario che non riproduce le condizioni per il cedimento a *MODO II* puro.

### 5.3 TCT-test: Thermoelastic Stress Analysis

L'analisi termoelastica degli stress è stata eseguita su campioni in configurazione TCT di seguito indicati, per convenienza, in questa sezione, con le sigle *TCT1* e *TCT2*. In Figura 32 sono riportate le mappe di ampiezza del segnale termoelastico riferiti a tali provini, per frequenza uguale a 4 Hz, al variare dell'ampiezza.

Le mappe sono state ottenute per una regione di interesse pari allo spessore del provino (4 mm) e un'altezza di 15.6 mm a cavallo della cricca trasversale. Come previsto in sezione 4.3, entrambi i test sono stati caratterizzati da un segnale termoelastico particolarmente basso e abbastanza uniforme sulla maggior parte dell'area di interesse. Nel caso di puro taglio nell'intorno delle cricche, l'ampiezza del segnale, come riportato prima, dovrebbe risultare nulla. Nei casi in esame, la presenza di zone calde nell'intorno della cricca, suggerisce la non sussistenza di tale condizione.

Al contrario, l'esistenza di queste aree è dovuta alla nascita di tensioni trasversali  $\sigma_z$  o da una variazione repentina delle tensioni longitudinali. In entrambi i casi, queste zone indicano un allontanamento dalle condizioni di taglio, e quindi, dalle condizioni di *MODO II* puro.

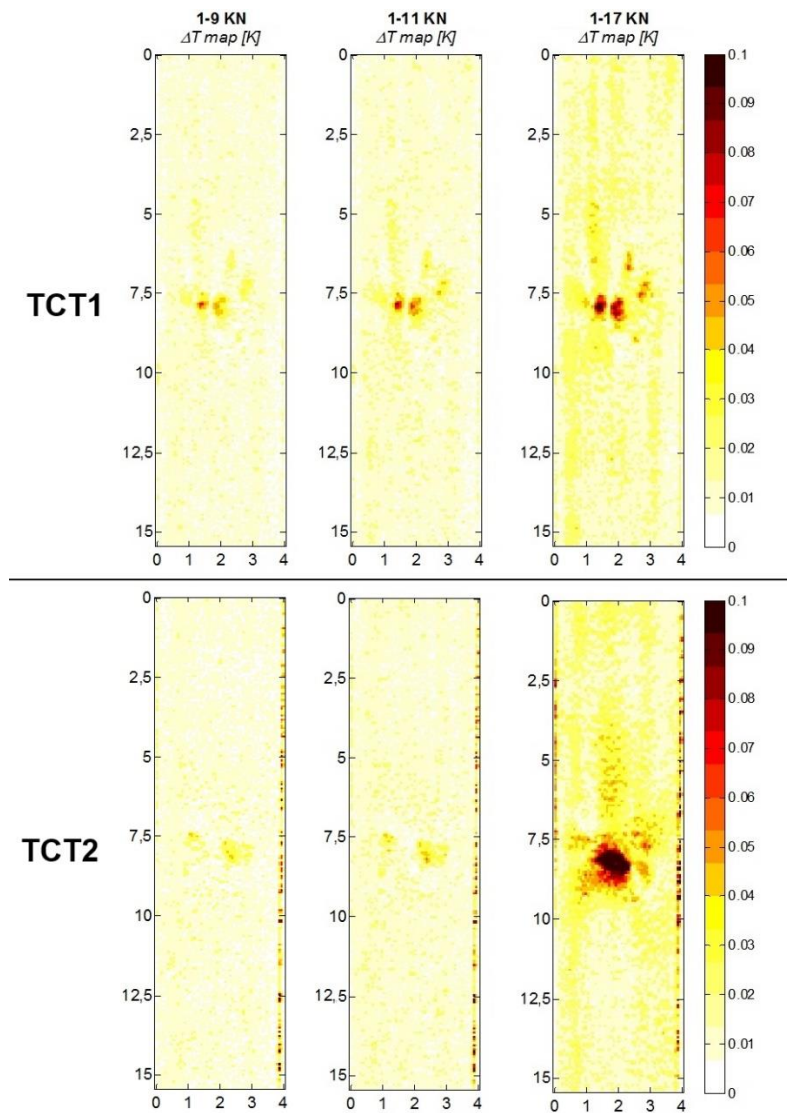


Figura 32 - Ampiezza del segnale termoelastico per i campioni TCT1 e TCT2

A conferma dei risultati della DIC, inoltre, la distribuzione di queste aree calde, sembra non essere uniforme e, dunque, le condizioni di simmetria non sono rispettate.

Per grandi ampiezze (1-17 kN), la tecnica mette in luce una zona di estensione crescente al crescere della frequenza, a segnale termoelastico relativamente alto (Figura 33).

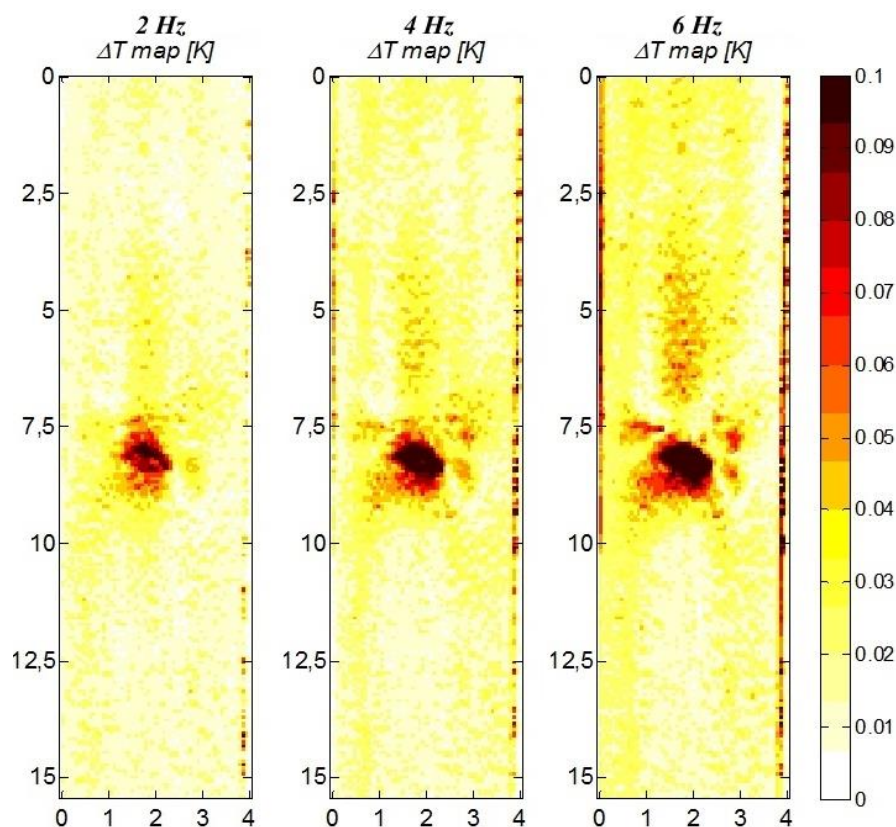


Figura 33 - TCT2 - TSA per ampiezza 1-17 kN

Questo comportamento è imputato al fatto che i livelli di carico a cui è stata fatta l'analisi, come si è osservato direttamente, portano al cedimento del pacchetto di resina che interessa la zona della cricca trasversale senza indurre fratture interlaminari (le ampiezze di carico utilizzate nella campagne sperimentali sono state stabilite tenendo conto dei dati delle prove quasistatiche e limitando i livelli di carico a range che non inducessero cedimenti imprevisti). E' stata prevista, inoltre la possibilità che potessero nascere, trattandosi di prove cicliche, delle delaminazioni per fatica. Tuttavia, tale evenienza non è stata osservata durante i test condotti nonostante si possa ipotizzare la nascita di difettosità localizzate che evolvono progressivamente. In Figura 33 è, infatti, mostrato un aumento dell'area interessata da un alto segnale termoelastico al variare della frequenza. Tenendo

contanto che il segnale non dovrebbero variare con la frequenza, si può concludere che tale comportamento sia dovuto parallelamente alla presenza di effetti dissipativi che comportano un aumento della temperatura e alla presenza di difetti che producono superfici libere di sfregare e generare calore da attrito.

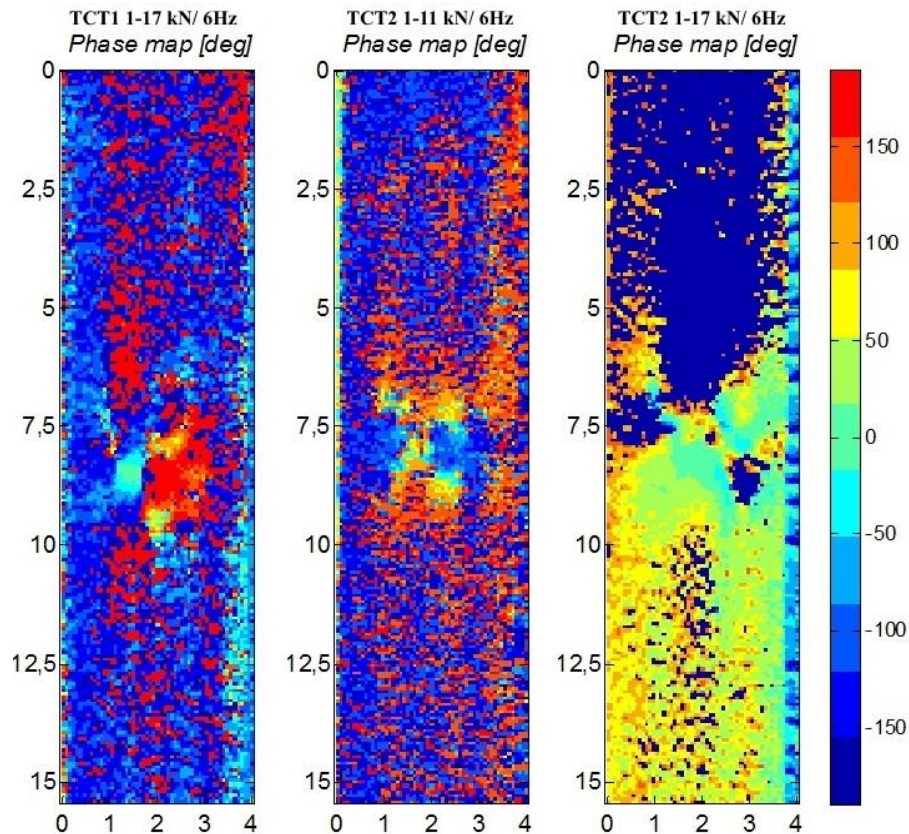


Figura 34 - Mappe di fase per i provini TCT1 e TCT2

Nella Figura 34 sono riportate, per agevolare la descrizione delle stesse, le mappe di fase riferite al provino TCT1 (ampiezza: 1-17 kN; frequenza: 6 Hz) e TCT2 (ampiezze 1-11 kN e 1-17 kN; frequenza: 6 Hz) secondo le didascalie inserite. Le conclusioni fatte sulla base di tali condizioni sono estendibili e generalizzabili.

Le mappe di fase risultano essere molto rumorose su tutta la superficie analizzata per via del segnale termoelastico relativamente basso. Tuttavia, la fase assume valori che differiscono tra loro di  $180^\circ$  a dimostrazione che il segnale risulta abbastanza omogeneo.

A seguito della descrizione globale delle mappe termoelastiche, è utile, ai fini della comprensione del comportamento del setup sperimentale, analizzare con più attenzione la zona nell'intorno della cricca. Per agevolare la discussione, si prenda in considerazione la Figura 35, zoom delle mappe sull'area interessata dalla cricca trasversale

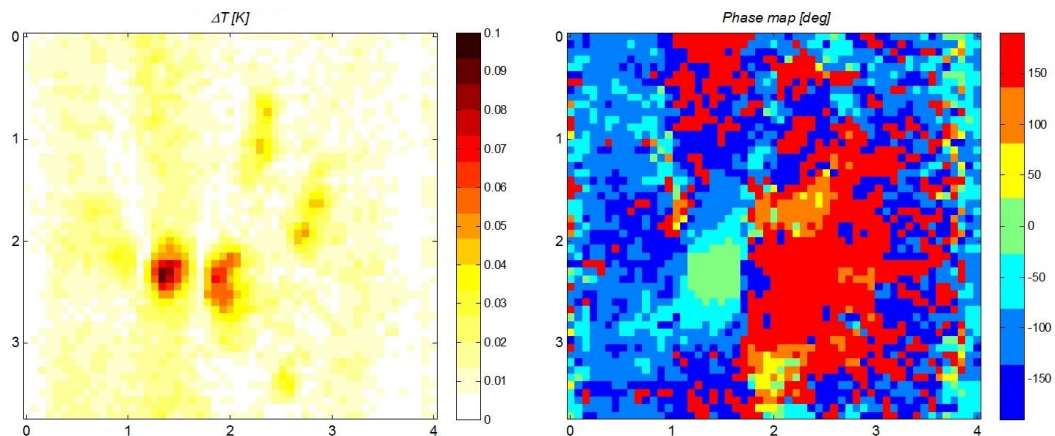


Figura 35 - Zoom sulla zona della cricca - TCT1, 1-17 kN, 6 Hz

Con riferimento alla mappa di fase, si possono distinguere due aree con inversione di fase pari a  $180^\circ$ . Come introdotto nelle sezioni precedenti, questa inversione può essere dovuta ad una zona di puro taglio o alla nascita di tensioni trasversali. Nel primo caso il segnale dovrebbe essere molto basso. Al contrario, come si nota dalla mappa del segnale termoelastico, non è questo il caso per cui si può concludere che tale risultato sia dovuto alla presenza di uno sforzo in direzione dello spessore. Inoltre, dal momento che l'inversione di fase indica un cambiamento





di segno di tale componente, come osservato in nei campioni realizzati in vacuum-bagging [19], esistono delle zone a compressione e delle zone a trazione. Tale risultato è confermato dall'analisi svolta tramite Digital Image Correlation.

La distribuzione di tensioni e deformazioni osservate non garantisce la condizione di *MODO II* puro per la delaminazione.

L'utilizzo della TSA permette di determinare, se esistono, effetti che portano alla dissipazione di energia. A tale scopo bisogna analizzare le mappe relative alla seconda armonica ottenuta tramite applicazione del filtro al doppio della frequenza (Dissipation Mode). Il risultato di tale operazione è riportato in Figura 36 e Figura 37 per il provino TCT2. La discussione seguente può essere generalizzata.

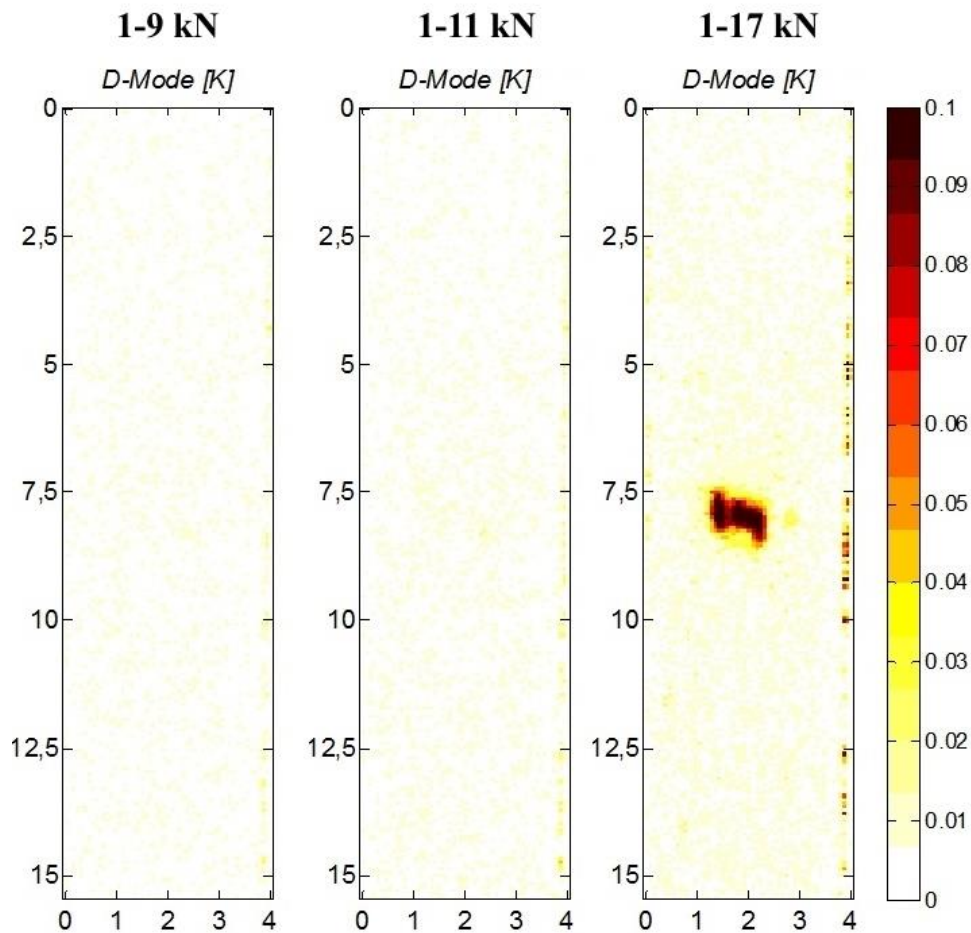


Figura 36 - Mappe in Dissipation Mode al variare dell'ampiezza di carico

In Figura 36 sono riportate le mappe della seconda armonica al variare dell'ampiezza di carico. Si può notare come, per bassi livelli di carico, il segnale relativo alla seconda armonica è nullo. Per carichi che determinano la rottura del pacchetto di resina (1-17 kN) si nota una concentrazione di segnale in corrispondenza alla cricca trasversale.

Per comprendere le motivazioni che portano alla nascita del segnale alla seconda armonica, è utile analizzare i risultati ottenuti per ampiezza fissa (1-17 kN), oltre i livelli di resistenza del pacchetto di resina, al variare della frequenza di carico (Figura 37)

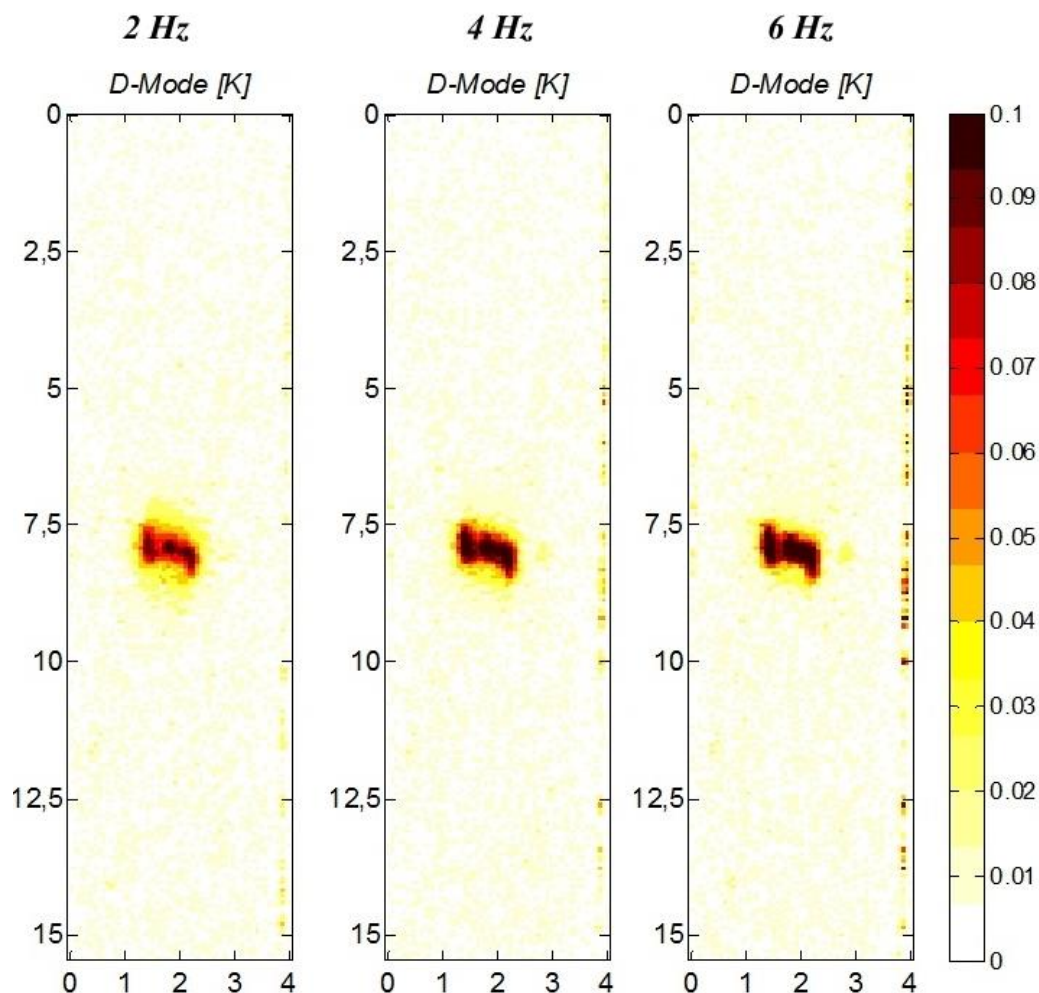


Figura 37 - Mappe in Dissipation Mode al variare della frequenza

Osservando tale figura si può notare un netto aumento dell'intensità del segnale in una zona circoscritta all'aumentare della frequenza di carico. Tale comportamento, considerando la Figura 23 in cui è stata messa in evidenza la reale geometria della cricca, è dovuto allo scorrimento tra le terminazioni delle lamine che si sovrappongono disordinatamente in corrispondenza della cricca. Essendo l'aumento della frequenza direttamente correlabile all'aumento della velocità relativa tra le due superfici sovrapposte, ne consegue che il segnale alla seconda armonica è dovuto a fenomeni di attrito che intervengono solo quando cede il



pacchetto di resina in condizioni dinamiche. Tale aliquota di energia, non deve essere considerata nei casi reali.

I risultati riportati in questa sezione dimostrano, ancora una volta, come il test non possa essere considerato attendibile per l'analisi a *MODO II*. Inoltre, non vengono registrati effetti dissipativi che intervengono durante l'evoluzione del cedimento.

#### 5.4 TCT-test: Frattografia SEM

L'area in prossimità della cricca è stata osservata tramite scansione SEM. Le immagini ottenute hanno fornito importanti informazioni sull'evoluzione del cedimento nei provini analizzati. Nelle figure seguenti, verranno mostrati e discussi i risultati di tali scansioni.

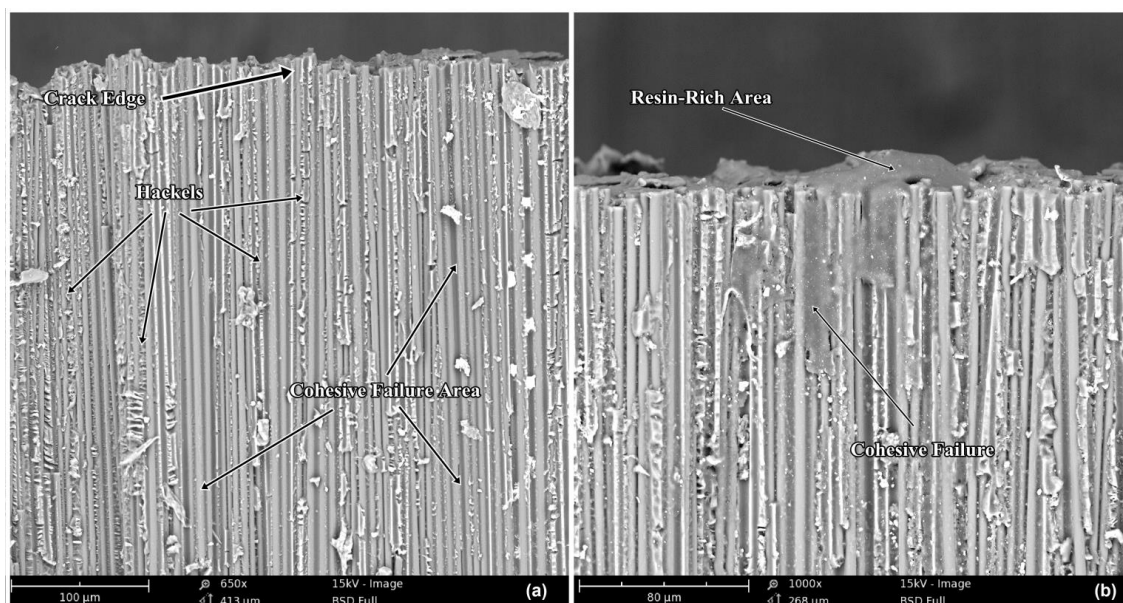


Figura 38 - SEM: Visione di insieme della zona vicina alla cricca trasversale di un provino TCT

La Figura 38 mostra una visione di insieme della zona prossima alla cricca trasversale ad ingrandimenti relativamente bassi. In particolare, in Figura 38a è possibile notare una distribuzione eterogenea di hackles e zone interessate da

frattura coesiva. Gli hackles sono, solitamente, associati ai cedimenti per *MODO II* mentre la frattura coesiva è relazionata a delaminazioni per *MODO I*. Nel caso in cui il grado di mode-mixity definito dalla 4.6 in sezione 4.4 tenda a 1, la presenza degli hackles è predominante come riportato da diversi lavori sperimentali [36][37][38]. Al contrario, in Figura 38b, si osservano ampie zone interessate da frattura coesiva in corrispondenza del pacchetto di resina.

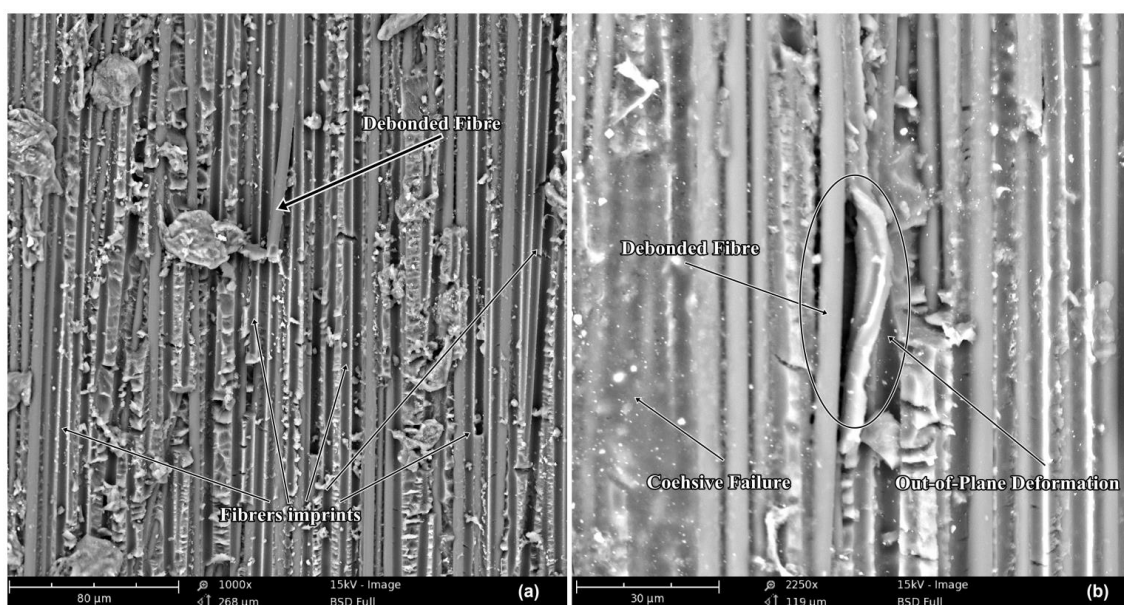


Figura 39 - SEM: Particolare della superficie di frattura per un provino TCT

In Figura 39a e Figura 39b vengono mostrate due differenti aree dove sembrano intervenire fenomeni di peeling the inducono a spostamenti e deformazioni fuori dal piano. In Figura 39a la posizione della fibra messa in evidenza dalla freccia, suggerisce la presenza di fiber-bridging seppur in piccole quantità. Tale comportamento è riscontrato quando si è in presenza di *MODO I*. D'altra parte, si notano ampie superfici lisce che corrispondono alle tracce lasciate dalle fibre scollate (fiber imprints). In Figura 39b, è messa in evidenza un'ampia zona che sembra essere interessate da deformazioni fuori dal piano e la presenza di una fibra

parzialmente scollata. Entrambi i comportamenti sono associati a cedimento coesivo.

Infine, In Figura 40a e Figura 40b sono mostrate delle immagini a più alto ingrandimento. In tali immagini, sono messe in evidenza sia la presenza di fibre scollate e fiber imprints, che degli heckles.

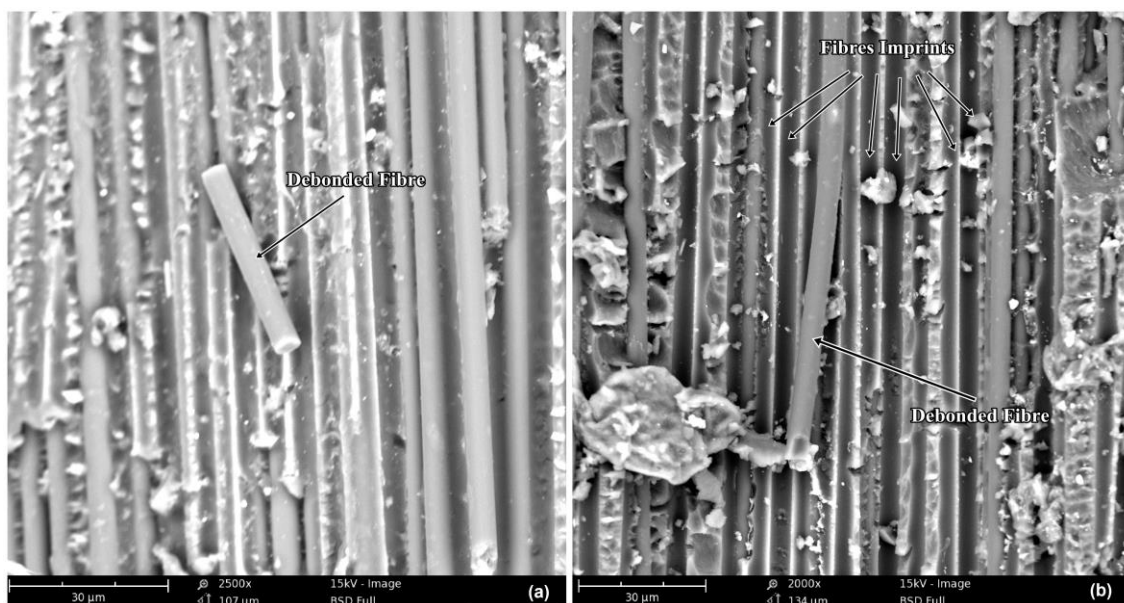


Figura 40 - SEM: ingrandimenti maggiori con fibre scollate

Le immagini SEM suggeriscono la presenza di un modo misto di cedere a conferma di quanto già individuato con le altre tecniche sperimentali e esposto precedentemente. La presenza di hackles in quantità come quelle osservate, non giustifica la presenza di un *MODO II* puro. Altresì, fenomeni e geometrie tipiche dei cedimenti a *MODO I*, indicano un certo grado di mode mixity e l'interazione contemporanea di *MODO I* e *MODO II*.

## 5.5 TCT-test: Simulazioni numeriche

Le simulazioni numeriche hanno permesso di valutare un duplice aspetto: in primo luogo, tramite l'applicazione della VCCT è stato possibile valutare l'effettivo

grado di Mode-Mixity nell'intorno della cricca e, parallelamente, si è visto, tramite algoritmo di rescaling ortotropico, che i risultati sperimentali sono estendibili a materiali diversi da quelli utilizzati per le campagne sperimentali.

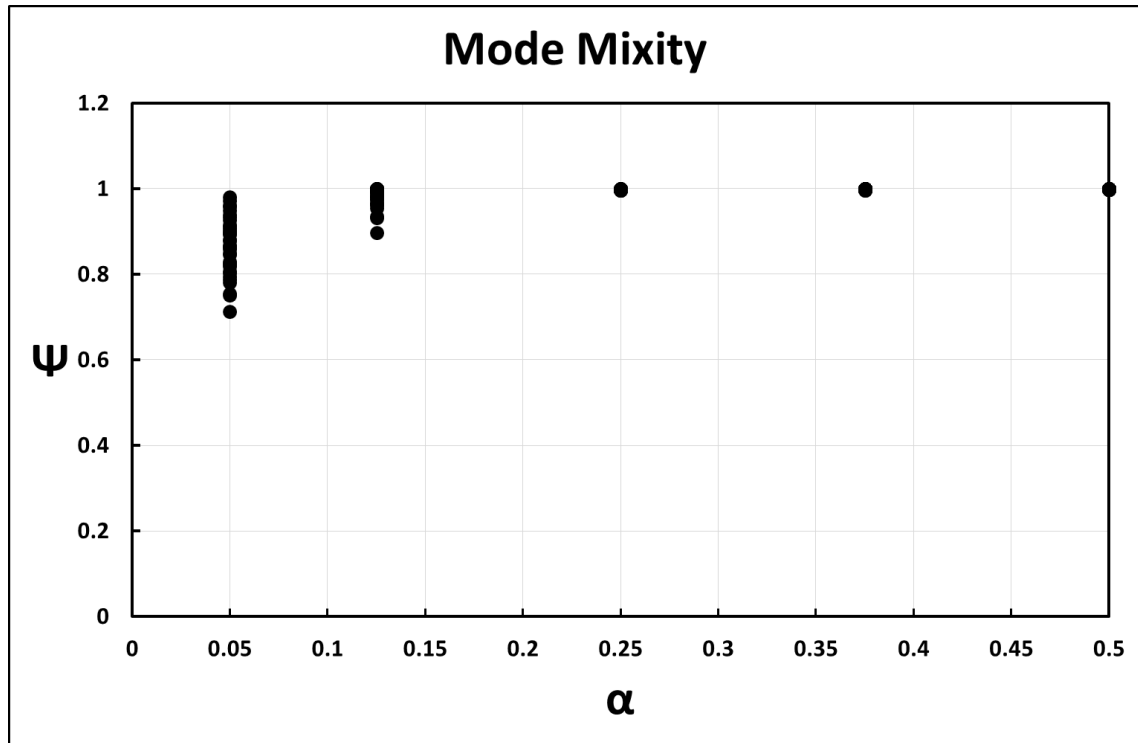


Figura 41 - Andamento della funzione del mode mixity al variare del rapporto tra lo spessore e la lunghezza di cricca

In Figura 41 è riportato l'andamento del Mode-Mixity al variare della lunghezza della cricca per diverse condizioni di ortotropia. Come è possibile notare, la convergenza dei punti alle condizioni di puro *MODO II*, per qualsiasi materiale, si verifica solo per lunghezze di cricca superiori 25% dello spessore. Tali lunghezze, possono essere considerate, con buona approssimazione, maggiori della lunghezza delle zona di processo, per cui, nelle condizioni reali, essendo la cricca di lunghezza nulla o inferiore, al 25% dello spessore, si è in presenza di modo misto. Diminuendo lo spessore del provino, è possibile avvicinarsi alla condizione di *MODO II* puro. Tuttavia, come già presentato, per piccoli spessori, l'influenza delle tensioni



trasversali e degli effetti di scala non è trascurabile e falserebbe i risultati del test.

Per grandi spessori, tale influenza è meno evidente. Ciò nonostante, la lunghezza della cricca richiesta per avere un *MODO II* puro sarebbe superiore alla lunghezza di processo e il valore reale di  $\Psi$  oscillerebbe intorno a 0.7.



## 6 Un nuovo setup sperimentale per lo studio della delaminazione a *MODO II*

Prendendo spunto dai risultati sperimentali presentati nel capitolo precedente, sono stati valutati gli effettivi vantaggi e svantaggi che si riscontrano nell'eseguire il TCT-test. Per facilitare la lettura del presente capitolo, verrà esposta una overview di quanto osservato in precedenza come paragrafo introduttivo. Di seguito allo stesso, verranno esposti e discussi i risultati sperimentali dei test eseguiti sulla nuova geometria proposta.

### 6.1 TCT test: overview

Il TCT-test, uno dei test tradizionalmente utilizzati per lo studio delle delaminazioni a *MODO II*, è caratterizzato da semplicità e velocità di esecuzione, caratteristiche che lo rendono interessante per le industrie coinvolte nella





progettazione e realizzazione di strutture in materiale composito ad alte performances.

Tuttavia, tale tipo di test ha mostrato dei punti deboli che sono stati indagati in questo lavoro di tesi.

In primo luogo, sono stati osservati degli effetti di scala: tale evenienza, rende la caratterizzazione dipendente dalla geometria testata e non può essere generalizzata al materiale. Per evitare l'influenza di tali effetti, controllare la stabilità della propagazione della cricca e ottenere quattro onset simmetrici, l'industria aeronautica tende ad utilizzare provini con spessori dell'ordine della decina di millimetri.

Come mostrato in sezione 5.5, utilizzando grandi spessori, il cedimento è a *MODO II* puro solo una volta che la cricca abbia raggiunto una certa lunghezza (quantificabile con il 25% dello spessore). D'altra parte, alle condizioni di nucleazione, il grado di Mode-Mixity oscilla intorno allo 0.7 per cui il test non garantisce risultati accettabili per il calcolo del ERR critico  $G_{IIc}$ . Per tali ragioni è consigliabile utilizzare spessori minori.

I test condotti su provini con spessori minori hanno mostrato un duplice aspetto:

- Per piccoli spessori (1.5 mm), il materiale ha raggiunto il carico di rottura prima delle condizioni di delaminazione, per cui, il fenomeno, non è stato osservato;
- Per spessori maggiori (3mm, 4 mm, 4.5 mm) i risultati hanno mostrato grande variabilità e dipendenza dalla geometria della cricca nonché dalla presenza di carichi trasversali che confermano le condizione di Mixed-Mode.



In particolare, è stato mostrato che, la nucleazione delle cricche, in generale, non avviene simmetricamente e in maniera contemporanea poiché per piccoli spessori, la geometria reale della cricca influenza maggiormente il comportamento del campione. D'altra parte, i metodi a campo intero hanno mostrato la presenza di un campo tensionale (o di deformazione) che si discosta dalle condizioni di *MODO II* puro. Ne consegue che, nella sua formulazione attuale, TCT-test non è abbastanza robusto da essere preso in considerazione come test standard.

Per risolvere le problematiche esposte, sono proposti, nei paragrafi seguenti, dei setup sperimentali alternativi che, secondo i risultati sperimentali, garantiscono robustezza e affidabilità del metodo.

## **6.2 Geometria e morfologia del setup proposto**

Tenendo conto delle simulazioni numeriche, con il fine di produrre un campione con  $\alpha$  superiore all'unità (condizione di *MODO II* puro secondo il grafico in Figura 41) una prima modifica è consistita nell'interporre degli strati di distaccante a partire dalla cricca trasversale che si estendano per 10 mm in un solo verso (Figura 15a riproposta, per completezza, di seguito). La scelta di fare estendere il distaccante in un solo verso è stata fatta per veicolare la nucleazione e la propagazione solo da un lato del campione in modo da dimezzare il numero di cricche da controllare e facilitare il raggiungimento delle condizioni di simmetria e contemporaneità degli eventi di delaminazione.



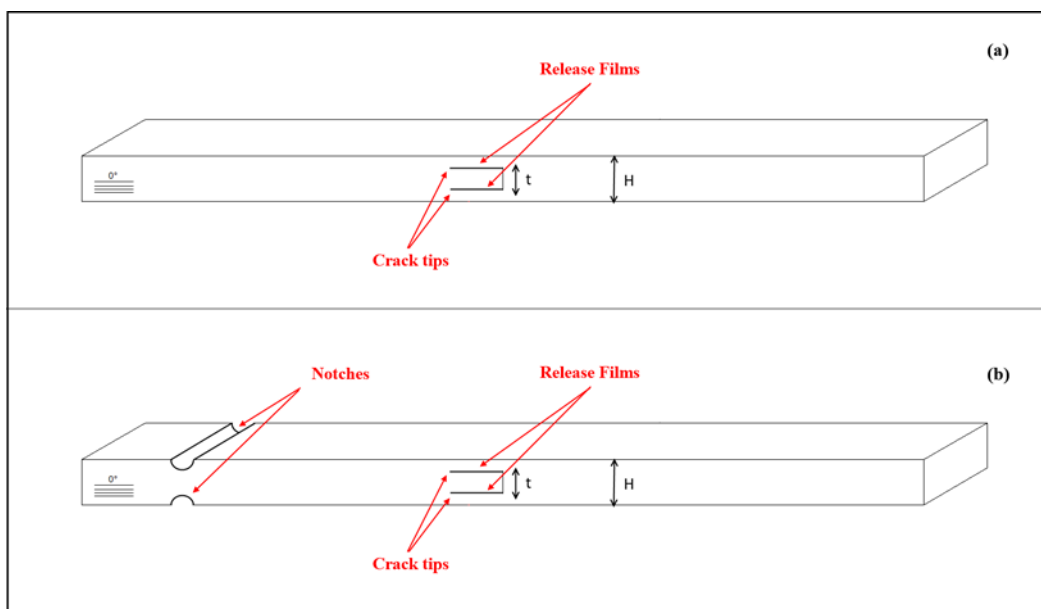


Figura 15 - Geometrie proposte

Considerata la nuova geometria, la relazione per il calcolo dell'ERR proposta con la 3.1, dovrà essere riscritta come segue:

$$G_{IIc} = \sigma_{\infty}^2 \frac{H}{2E_{11}} \left( \frac{1}{\phi_c} - 1 \right) \quad 6.1$$

Tenuto conto delle difficoltà avute nella determinazione del cari critico da inserire come input per il calcolo dell'ERR critico, in una seconda versione proposta, sono stati aggiunti due notch a profilo circolare in posizione periferica per rendere instabile la propagazione e catastrofico il cedimento (Figura 15b).

La scelta della forma del notch è stata fatta prevedendo un valore di fattore di intensificazione degli sforzi inferiore per un profilo curvilineo rispetto alla pre-cricca artificiale ottenuta grazie ai film distaccanti. La posizione periferica dello stesso rende, le due geometrie proposte, meccanicamente equivalenti.

La reale geometria della cricca è stata messa in evidenza grazie ai metodi esposti in sezione 4.1 e le immagini acquisite sono presentate nella seguente Figura 42.

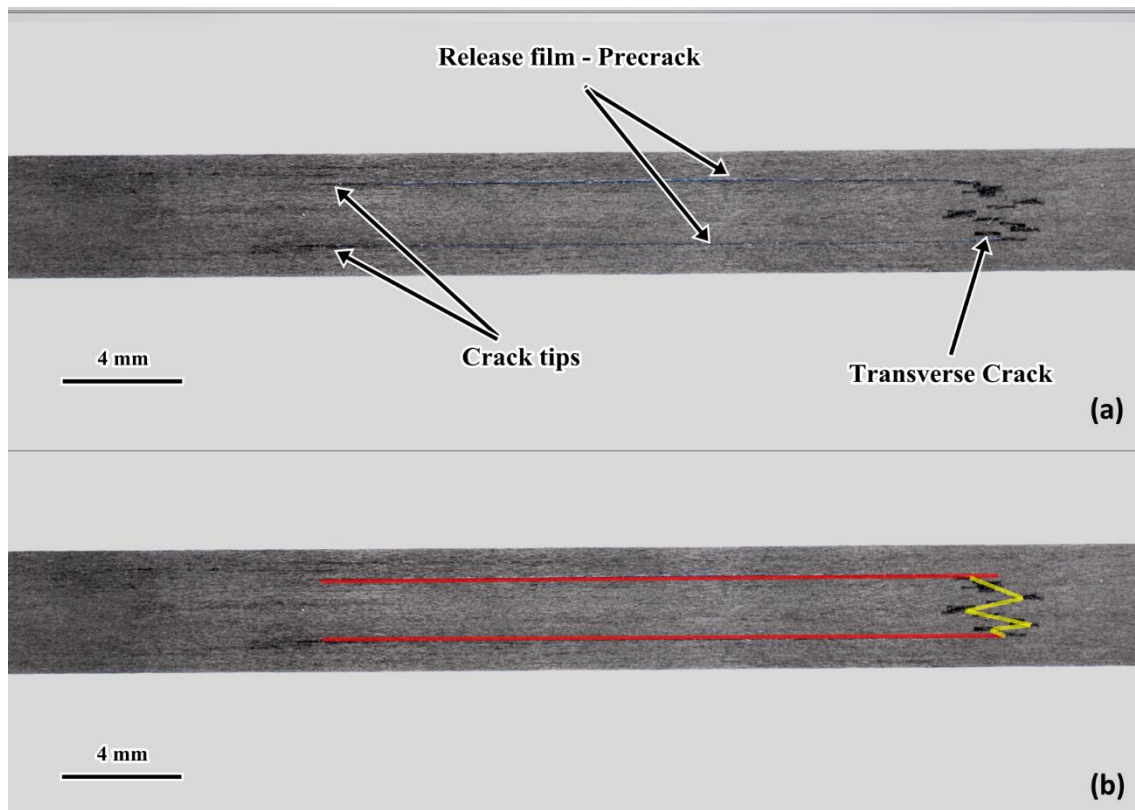


Figura 42 - Macrografia della zona prossima alla cricca per la nuova geometria proposta

In Figura 42a sono ben visibili sia la cricca trasversale che i film distaccanti inseriti in fase di laminazione. Come è possibile notare, la cricca trasversale mantiene la sua caratteristica irregolarità ed è distinguibile una zona ricca di resina. Tuttavia, le posizioni dei crack-tips è remota rispetto alla cricca trasversale per cui quest'ultima non influenza il processo di nucleazione e propagazione iniziale. Inoltre, considerando la Figura 42b mostra che il grado di simmetria in corrispondenza dei crack-tips è nettamente migliorato rispetto alla configurazione precedente.

L'indagine svolta per mezzo di tomografia computerizzata, ha messo in luce la reale conformazione della zona prossima ai crack tips evidenziando una diversa distribuzione dei difetti se confrontata con il setup classico.

In Figura 43a sono ben visibili i film distaccanti inseriti a partire dalla cricca trasversale. Nonostante presentino un andamento non rettilineo, tale conformazione, essendo di lieve entità, non influenza i risultati. Inoltre in Figura 43a e Figura 43b è mostrato un difetto tipico (un vuoto) che si viene a formare in corrispondenza della terminazione del film distaccante. La micro-CT rivela che tali difetti interessano solo la zona prossima alla terminazione del film e sono di entità trascurabile

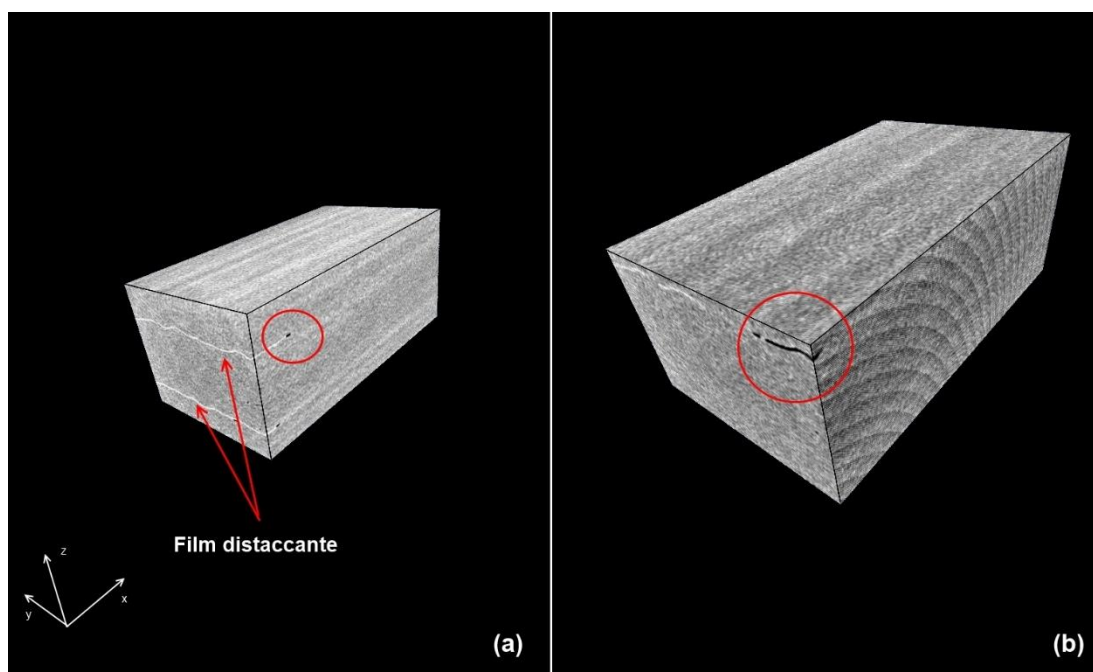


Figura 43 - Micro-CT per la configurazione analizzata: crack tips

In Figura 44 è presentata la distribuzione dei difetti nella zona dei crack tips.

Se confrontata con i risultati corrispondenti alla geometria classica del provino per il test TCT, la quantità dei difetti è nettamente minore e non si rileva la presenza di vuoti a bolla. A conferma di quanto appena esposto, nella zona prossima alle terminazioni del film distaccante sono presenti dei difetti di lieve entità che influenzano marginalmente il comportamento globale del provino.

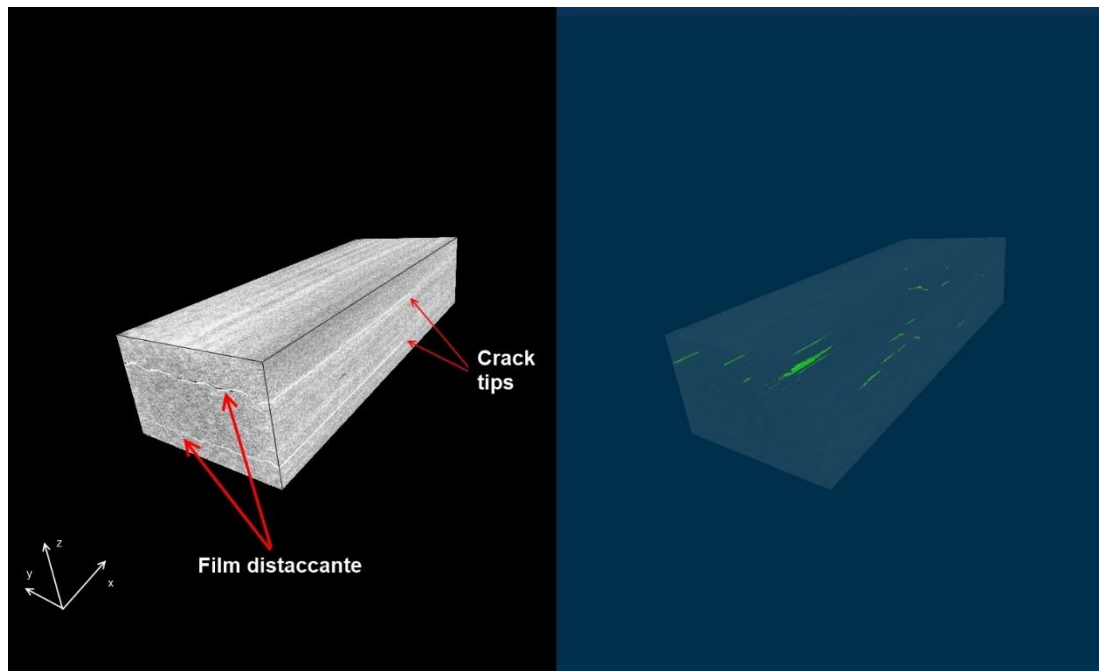


Figura 44 - Micro-CT della nuova geometria proposta: distribuzione dei difetti

Infine, per completezza, in Figura 45, è mostrata una singola sezione del provino analizzato in corrispondenza della zona interessata dai film distaccanti. La discussione dei risultati su riportata è estendibile anche a questa figura dove è ben evidente la geometria dell'area.

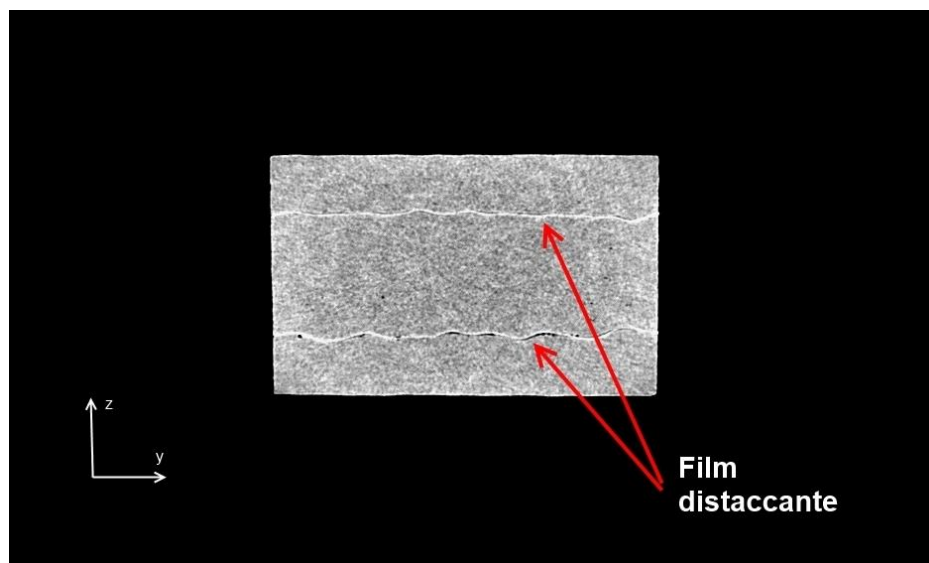


Figura 45 - Micro-CT della nuova geometria proposta: slice

### 6.3 Test quasistatici e Digital Image Correlation per le nuove geometrie proposte

Test quasistatici sono stati eseguiti sui provini a geometria modificata. In particolare, in maniera equivalente al caso del TCT-test, i provini sono stati posti a trazione lungo la direzione delle fibre  $x$  (direzione 1 nel riferimento locale). Durante i test, è stata applicata la tecnica DIC al fine di acquisire informazioni sul campo intero degli spostamenti.

In Figura 46 è mostrata una curva carico spostamento tipica (in controllo di forza) per un test su geometria modificata. Il provino testato prevedeva la presenza di un notch che non ha influenzato la zona nell'intorno della cricca essendo, esso, in posizione remota.

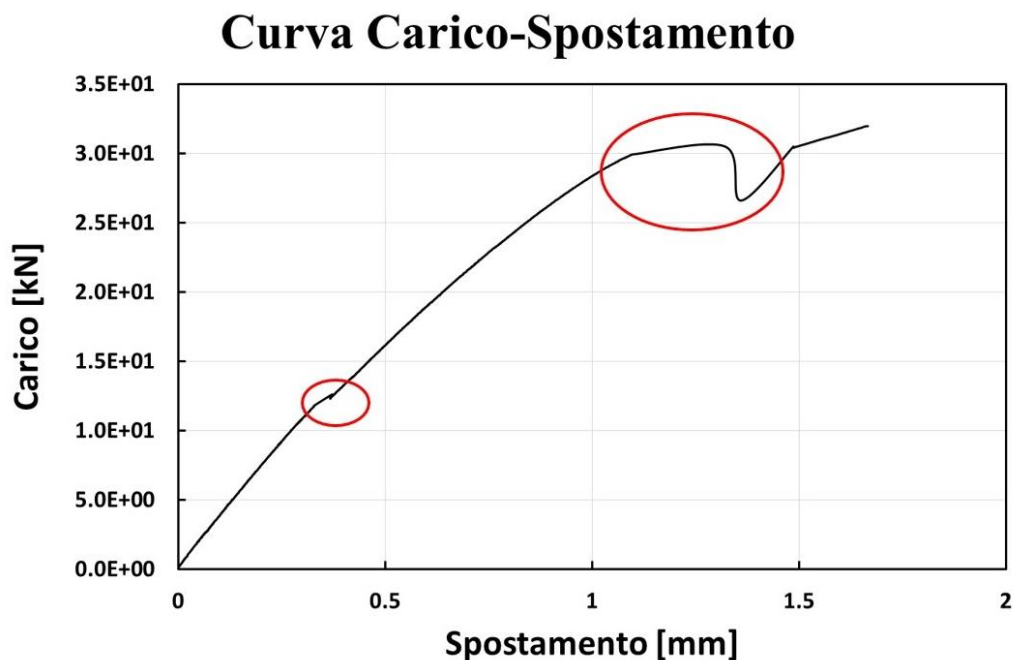


Figura 46 - Curva carico spostamento per un provino con geometria modificata. Esempio di provino con Notch

È utile dividere la curva in due periodi. Nel primo tratto, fino a carichi tra 10 kN e 15 kN, il provino mantiene intatto il pacchetto di resina in corrispondenza della

cricca orizzontale. Nel secondo tratto, dopo il cedimento dell'accumulo di resina, il provino continua ad essere caricato fino alla delaminazione. Per entrambe le fasi, sono riportati i risultati ottenuti tramite DIC in Figura 47 e Figura 48, rispettivamente.

In Figura 47, in particolare, sono presentati i grafici riguardanti le deformazioni da taglio  $\varepsilon_{xy}$  e trasversali  $\varepsilon_{zz}$  prima della rottura del pacchetto di resina (11.3 kN). In entrambe i casi, è possibile osservare una distribuzioni di deformazioni abbastanza omogenea e assimilabile a 0. Si notano, inoltre, delle deformazioni più grandi in corrispondenza del film di teflon sul lato destro del provino. La stessa concentrazione non è stata riscontrata a sinistra, probabilmente, per via di fenomeni di aderenza. Poiché, comunque, la misura reale viene eseguita dopo la rottura del pacchetto, tale comportamento non influisce sulla robustezza della prova.

Nella seguente Figura 48, è mostrato il campo delle deformazioni  $\varepsilon_{zz}$  e  $\varepsilon_{xy}$  dopo il cedimento della cricca (11.7 kN). In riferimento alle deformazioni trasversali, è evidenziabile come i livelli di deformazione riscontrati in prossimità dei crack tips possano essere considerati pari a zero. Tale evenienza costituisce una differenza sostanziale rispetto allo scenario presentato per il TCT-test. La mancanza di tali sforzi suggerisce la presenza di un *MODO II* puro. D'altra parte, la mappa relativa alle  $\varepsilon_{xy}$  è caratterizzata da zone ad alta concentrazione di deformazione in corrispondenza dei film distaccanti dovute allo scorrimento relativo tra le superfici a contatto. Queste zone si estendono fino ai crack tips rivelando una zona sottoposta a taglio puro.

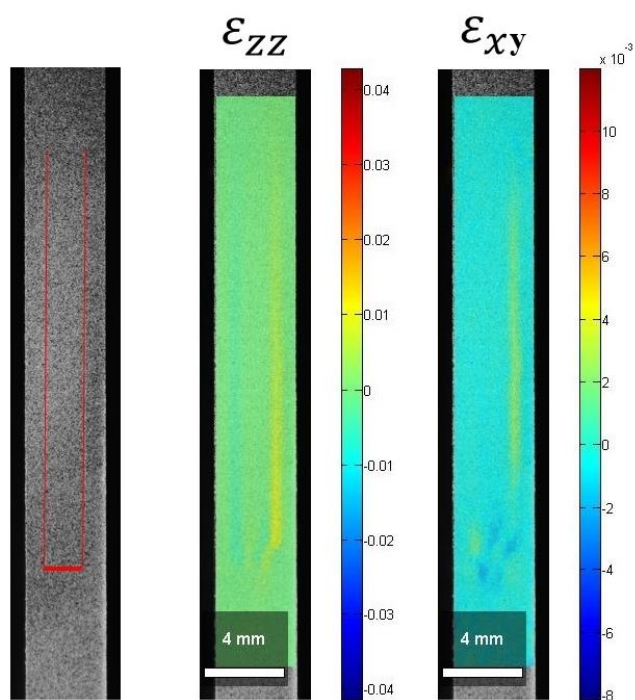


Figura 47 - Campo delle deformazioni prima del cedimento del pacchetto di resina.

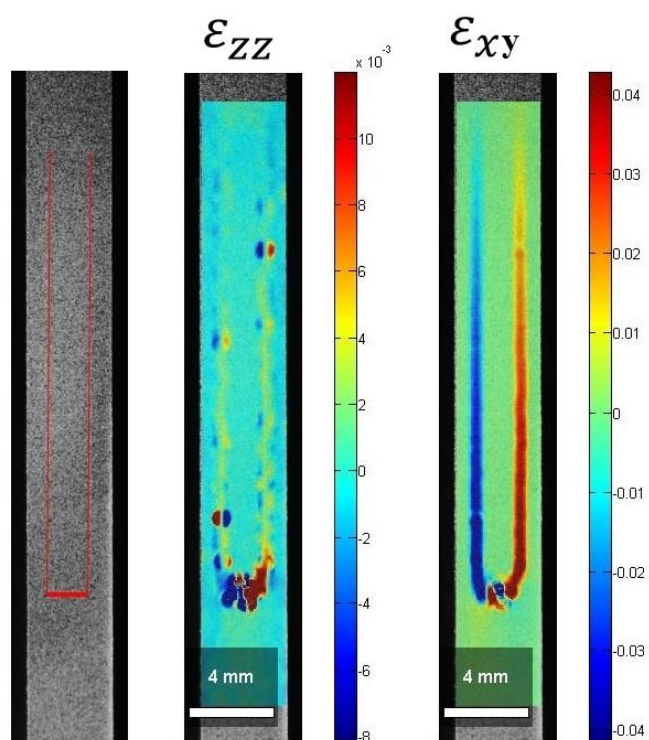


Figura 48 - Campo delle deformazioni a valle del cedimento del pacchetto di resina



Per completezza, in Figura 49 si riporta il campo di deformazioni nelle sue tre componenti per un provino portato a rottura a seguito del cedimento del pacchetto di resina: il campione è stato caricato fino al cedimento dell'accumulo e poi scaricato. A partire da questa condizione si è eseguito il test e ne è stato valutato il campo delle deformazioni. I dati riportati si riferiscono ad un campione senza notch per un carico di 19 kN.

Anche in questo caso le deformazioni trasversali sono nulle nell'intorno della cricca e il campo degli scorrimenti suggerisce una situazione di taglio puro nell'intorno dei crack tips. Sono mostrati anche le deformazioni longitudinali che rivelano come la zona centrale sia scarica dopo il cedimento del pacchetto di resina.

Confrontando le figure appena descritte si conclude che la presenza del notch non influenza il comportamento del provino nell'intorno della cricca.

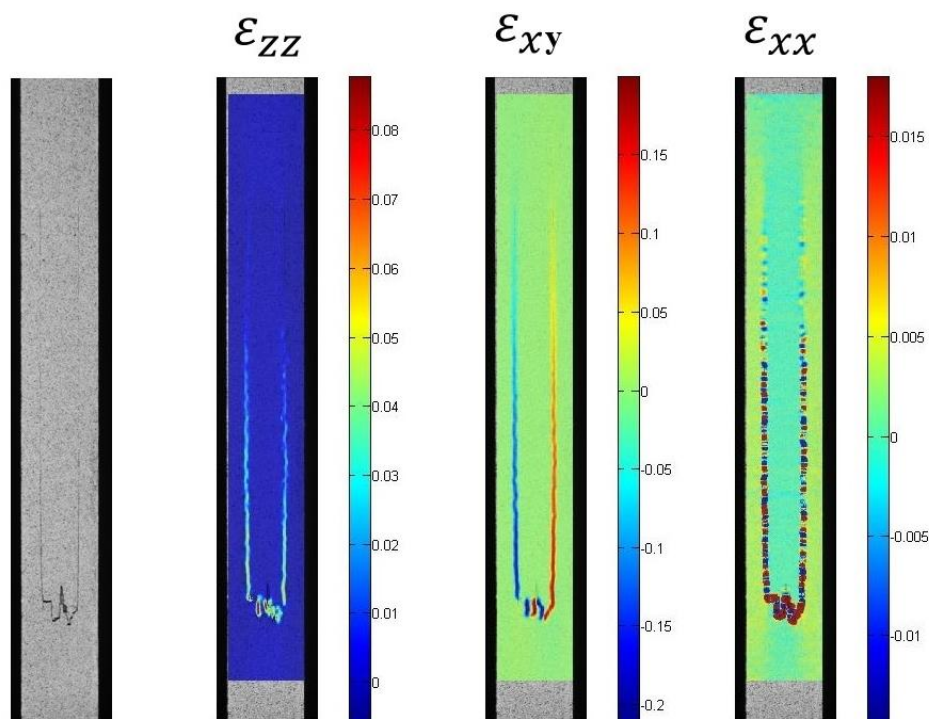


Figura 49 - Campi di deformazioni dopo la rottura del pacchetto di resina per un provino senza notch



Infine, di seguito la curva Carico-Spostamento per il provino appena analizzato (Figura 50).

In questo caso non è visibile la caduta dovuto al cedimento del pacchetto di resina poiché, come già ribadito, precedentemente precriccato.

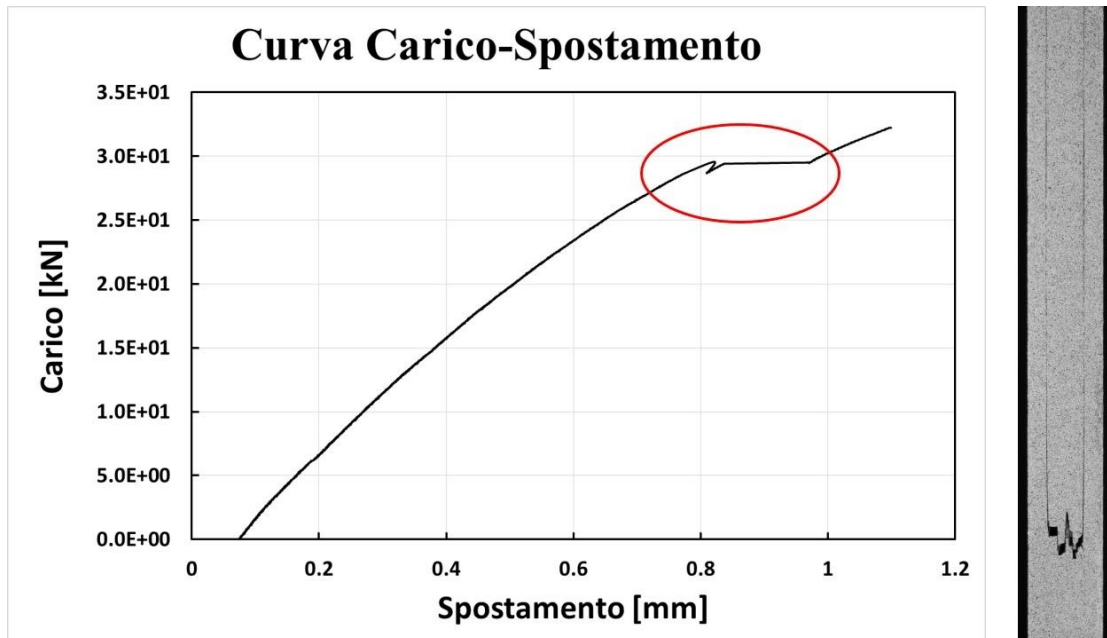
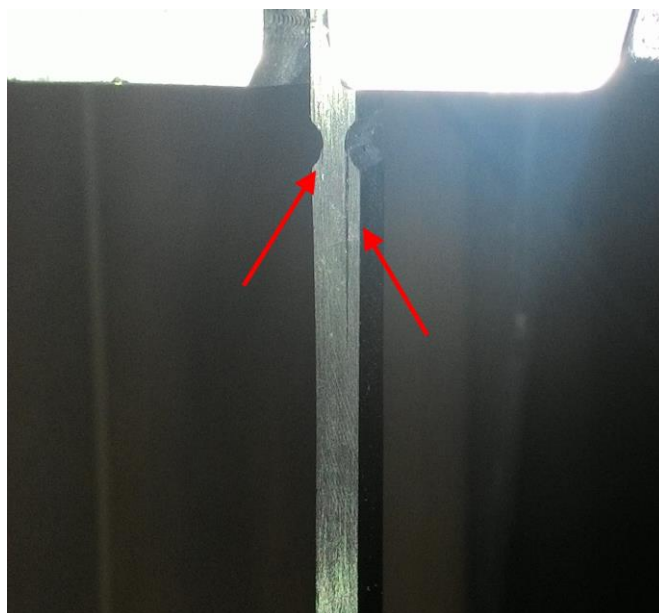


Figura 50 - Diagramma Carico spostamento per un provino precriccato senza notch – Immagine del provino dopo il cedimento

#### 6.4 Comportamento del provino con il notch

Nel paragrafo precedente, si è dimostrato come, il notch, se posto in posizione remota rispetto ai crack tips, non influenza la zona prossima alla cricca. Tuttavia, si è ritenuto necessario dedicare il presente breve paragrafo alla descrizione del comportamento della zona interessata dall'intaglio.

Come mostrato in Figura 51, per tutti i provini testati, sono state osservate delle delaminazioni in corrispondenza del notch per carichi inferiori dei carichi critici.



*Figura 51 - Delaminazioni in corrispondenza del notch*

La produzione del notch implica la nascita di bordi liberi. Come è noto, per un laminato composito, la tale condizione provoca la nascita di uno stato di tensione triassiale in corrispondenza di quest'area che portano alla delaminazione del provino. Tale fenomeno è spesso riportato come “instaurazione di tensioni interlaminari da bordo libero”

La nascita di questi difetti potrebbe falsare il test ed è auspicabile uno studio approfondito volto alla soluzione del problema. Tuttavia, il setup resta valido e robusto in assenza di notch e, come mostrato in Figura 50, il carico corrispondente alla delaminazione è univocamente determinabile.

## **6.5 Thermoelastic Stress Analysis per le nuove geometrie proposte**

L'analisi termografica è stata applicata sui provini con la nuova geometria proposta al fine di valutare il campo delle tensioni nella zona interessata dalla cricca trasversale e dai film distaccanti. Tutte le acquisizioni sono state fatte imponendo

una distanza focale pari a  $20 \pm 5 \text{ cm}$ , con un integration time pari a  $2934 \mu\text{s}$  tra  $5^\circ\text{C}$  e  $35^\circ\text{C}$  su una finestra temporale di osservazione di  $32 \text{ s}$  a una frequenza di triggering pari a  $64 \text{ Hz}$ . I risultati dell'analisi al variare delle condizioni verranno presentati e discussi di seguito. Tutte le figure mostrate nel proseguo del paragrafo sono state ritagliate per una larghezza pari allo spessore del provino (dimensione orizzontale pari a  $4 \text{ mm}$ ).

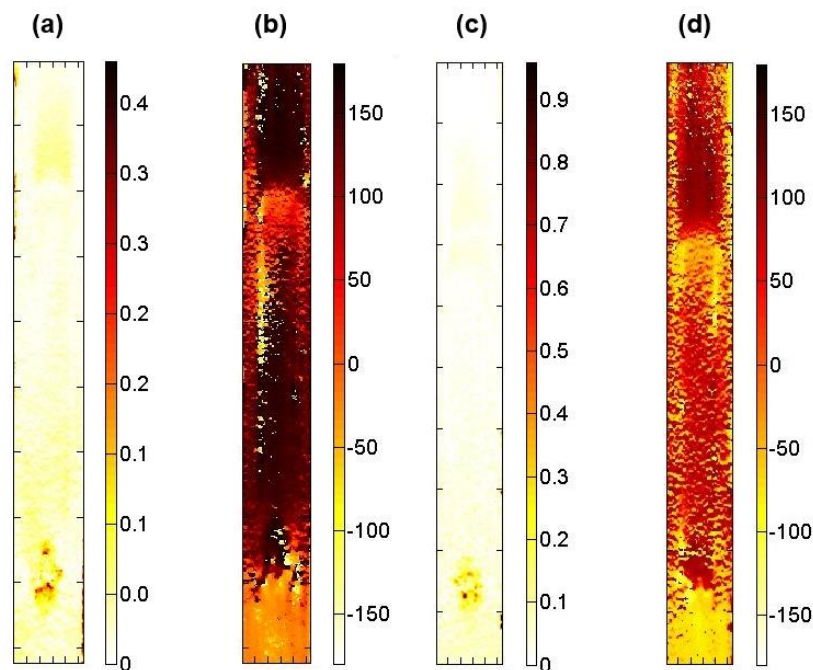
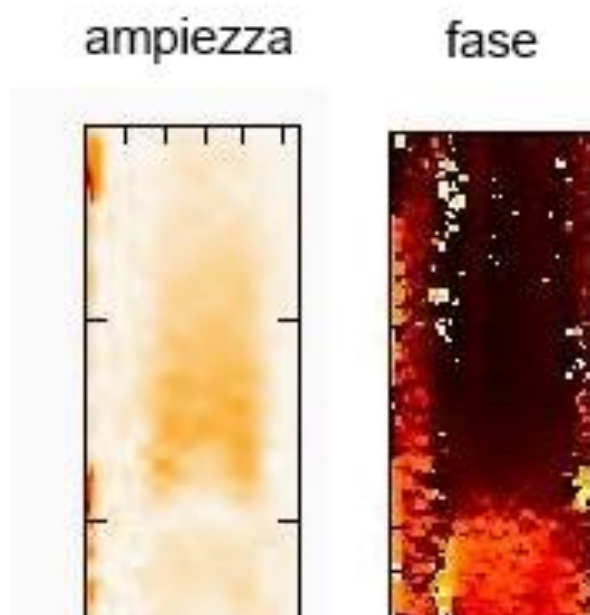


Figura 52 - Risultati della TSA per la nuova geometria a valle del cedimento del pacchetto di resina: (a) ampiezza del segnale per un provino senza notch; (b) fase per un provino senza notch; (c) ampiezza del segnale per un provino con notch; (d) fase per un provino con notch.  $4 \text{ Hz}$ ,  $1\text{-}14 \text{ kN}$

In Figura 52 sono mostrate le mappe di ampiezza e fase, per due provini con e senza notch, rispettivamente. A conferma di quanto esposto precedentemente, la presenza dell'intaglio in posizione periferica non influenza il campo tensionale nella zona di interesse. In tali figure, è ben distinguibile la zona attenzionata dalla cricca trasversale, dove sono presenti dei picchi di segnale, con una distribuzione

riconducibile al caso del TCT-test. Inoltre, è possibile individuare, in corrispondenza dei crack tips, un'area caratterizzata da un'inversione di fase dovuta, non alla nascita di tensioni trasversali, ma al forte variazione di tensione lungo la direzione delle fibre. L'appendice delimitata lateralmente dai film distaccanti e inferiormente dalla cricca trasversale è, infatti, tendenzialmente scarica. Inoltre, il segnale non è abbastanza ampio da giustificare il fenomeno con la nascita di sforzi in direzione dello spessore come nel caso del TCT-test (Figura 53).



*Figura 53 - Risultato dell'analisi TSA in corrispondenza dei crack tips – Provino senza notch*

Come è possibile notare dalla Figura 54, le conclusioni formulate per la fase e l'ampiezza del segnale termoelastico, possono essere estese alla mappa della seconda armonica che non viene alterata dalla presenza del notch. I picchi di ampiezza in corrispondenza della cricca trasversale sono riconducibili, come nel caso del TCT-test, ai movimenti relativi, durante i cicli, delle terminazioni delle singole lamine che sono sovrapposte per via del processo di manifattura (sezione

6.2). Seppur in maniera più blanda, dei fenomeni dissipativi sono osservabili in corrispondenza dei film distaccanti. Tuttavia, nel bilancio energetico, queste aliquote non devono essere considerate perché costituiscono una peculiarità esclusiva delle prove cicliche.

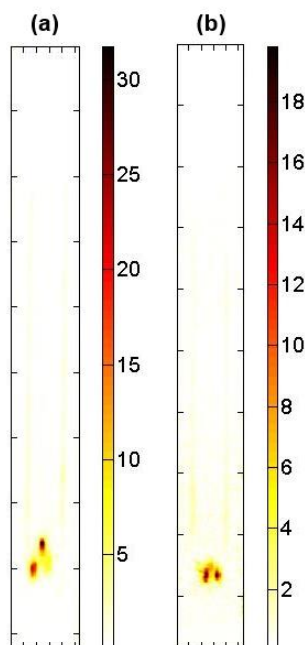


Figura 54 - Mappe relative alla seconda armonica per la nuova geometria proposta: (a) Provino senza notch; (b) Provino con notch.

Nella seguente Figura 55 sono mostrati i risultati dell'analisi termografica degli stress su due campioni che differiscono per lo stato del pacchetto di resina: In tale figura, (a) indica la condizione in cui il pacchetto è ancora integro, mentre, (b) la condizione a valle del cedimento dell'accumulo di resina.

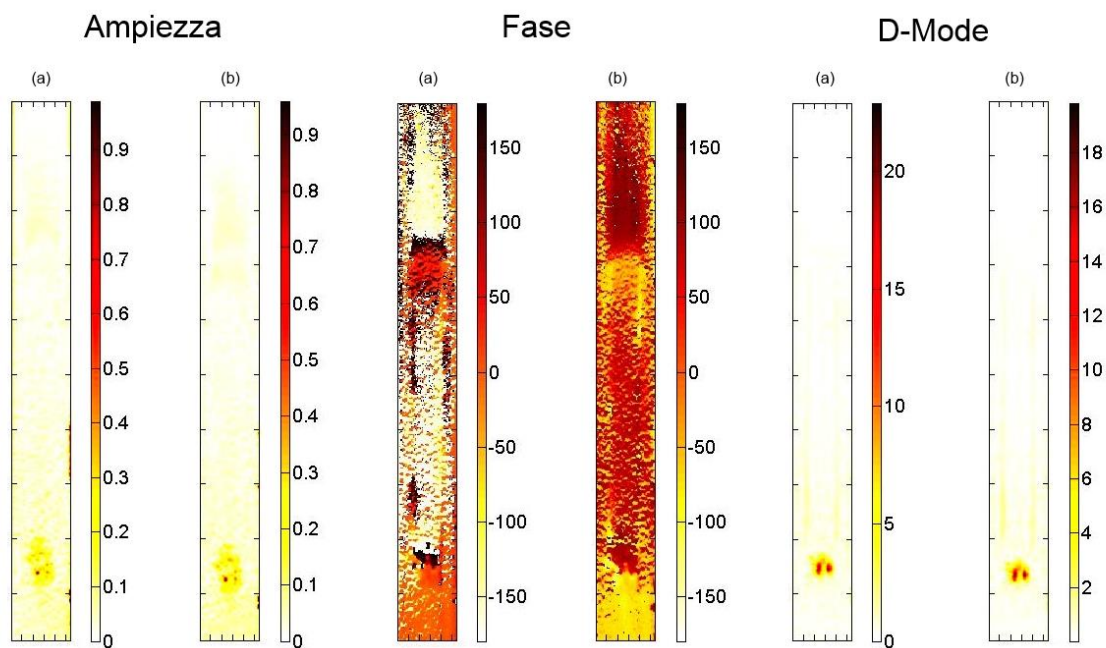


Figura 55 - Risultati dell'analisi termografica per un provino con pacchetto di resina integro (a) e un provino con pacchetto di resina rotto (b)

Sia nel caso di pacchetto integro che ne caso di analisi eseguita a valle del cedimento dell'accumulo di resina in corrispondenza della cricca trasversale, le mappe ricavate dalla TSA, mostrano delle distribuzioni qualitativamente confrontabili. Delle leggere differenze si riscontrano valutando le mappe relative alla seconda armonica in corrispondenza dei film distaccanti: il cedimento del pacchetto implica la possibilità di movimenti più ampi dell'appendice scarica e, conseguentemente, un aumento del segnale. Tali differenze sono tuttavia trascurabili.

Infine, in Figura 56, tenuto conto che la variazione di frequenza non influenza i risultati relativi all'ampiezza del segnale termoelastico e alla sua fase, sono mostrati i risultati delle analisi TSA filtrate alla seconda armonica al fine di spiegare la causa che porta a fenomeni dissipativi.

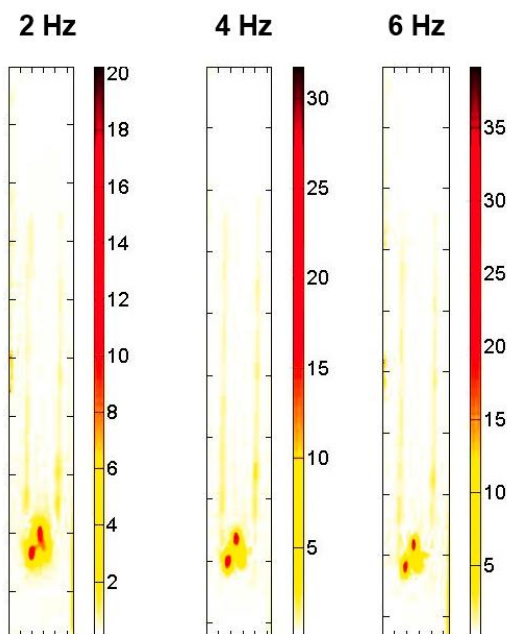


Figura 56 - Mappe relative alla seconda armonica al variare della frequenza di carico

L'aumento dei valori di ampiezza in D-Mode (dissipazione) riscontrato all'aumentare delle ampiezze, come spiegato in sezione 5.3, dipende dalla velocità relativa tra le superfici libere a contatto nel provino ed è, dunque, imputabile a fenomeni di attrito che non vanno considerati in condizioni quasistatiche. Inoltre, le mappe del campione ad opportuna distanza dalla cricca trasversale e dai film distaccanti, si presentano abbastanza omogenee con valori prossimi a zero o, comunque, sotto la soglia di rumore. Per tali ragioni, i fenomeni dissipativi non sono riconducibili a plasticizzazione.

I risultati riportati nella presente sezione suggeriscono che, il setup sperimentale proposto, data la distribuzione di tensioni, e, in particolare, la mancanza degli sforzi trasversali osservati nel caso di TCT-test, permette di caratterizzare il materiale a frattura per puro *MODO II*.



## 6.6 Frattografia SEM per la nuova geometria proposta

L'area in prossimità dei crack tips è stata osservata tramite scansione SEM dei provini testati al fine di ricavare delle informazioni a partire dalla morfologia delle superfici di frattura. Di seguito verranno mostrate e discusse le immagini ottenute da tale analisi.

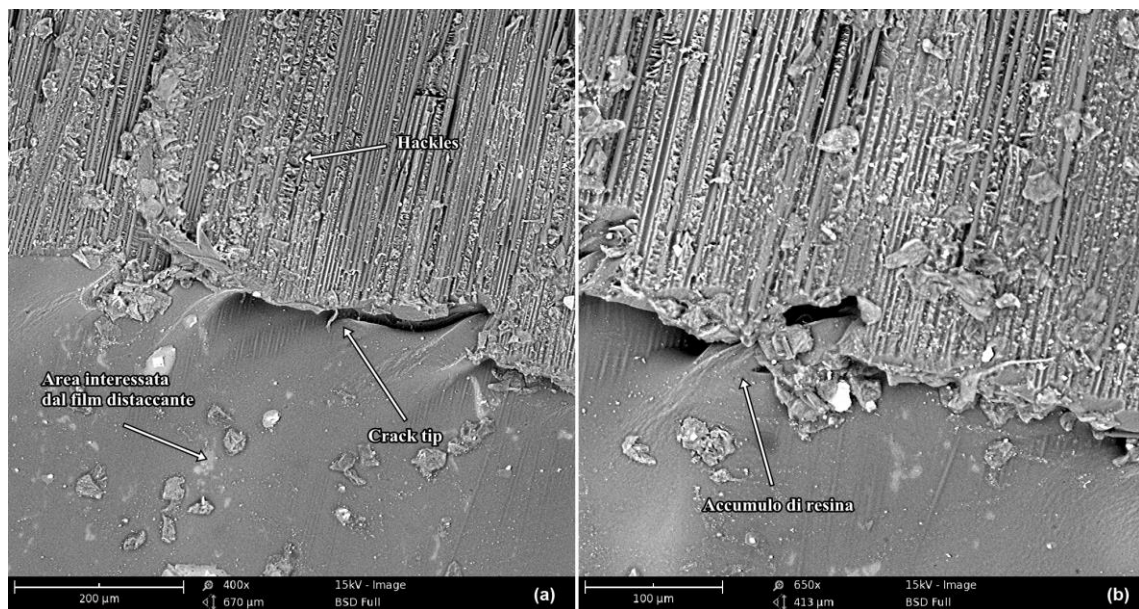


Figura 57 - SEM in corrispondenza del crack tip

In Figura 57a e Figura 57b sono mostrate due immagini acquisite in corrispondenza del crack tip a fattori di ingrandimento relativamente bassi (400x e 600x, rispettivamente). In entrambe, è ben visibile un'ampia zona caratterizzata da una superficie liscia senza segni tipicamente imputabili a meccanismi di cedimento. Tale zona corrisponde alla porzione di pannello a contatto con il film distaccante che contribuisce a darle un aspetto regolare. In entrambe le immagini è, inoltre, facilmente individuabile l'apice di cricca. Quest'ultimo risulta essere non perfettamente rettilineo a scala micrometrica. Tuttavia, l'influenza di tale irregolarità sul comportamento macroscopico del campione è trascurabile.



Nel caso della nuova geometria proposta, sono visibili degli accumuli di resina seppur in quantità minime e la loro presenza, viste le dimensioni, non condiziona l'evoluzione del cedimento.

Confrontando tali immagini con quelle relative al TCT-test (Figura 38), è possibile notare una distribuzione più fitta e regolare degli hackles, tipici dei cedimenti a *MODO II*.

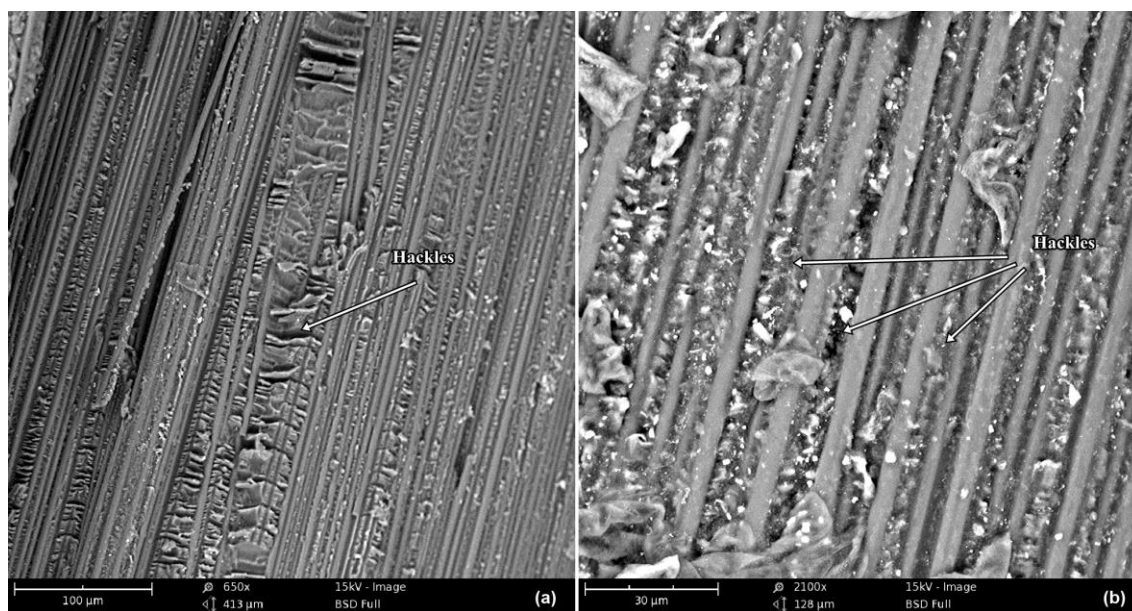


Figura 58 - SEM delle superfici di frattura della nuova geometria proposta

La distribuzione degli hackles è meglio visibile in Figura 58a e Figura 58b. In particolare, in Figura 58a, in una visione di insieme, si può notare la distribuzione omogenea e regolare degli stessi in tutta la matrice. Inoltre, come si vede con ingrandimenti maggiori (Figura 58b), non vi è traccia di fiber inprints come osservato per le superfici relative al TCT-test (Figura 40). Inoltre, l'indagine non ha mostrato segni di deformazioni riconducibili a cedimenti a *MODO I* (fiber peeling, fiber bridging o deformazioni fuori dal piano).



Le immagini presentate nel presente paragrafo suggeriscono che il setup proposto induce, in corrispondenza delle crack tips, a cedimenti a *MODO II* puro.

## 6.7 Risultati delle simulazioni numeriche per la nuova geometria proposta

Anche nel caso della geometria modificata, sono state eseguite simulazioni su modello parametrico ed è stato calcolato il parametro  $\Psi$  al variare delle diverse condizioni. Nel caso in esame, essendo presente il notch, il modello è stato dipendente dalle seguenti variabili:

- $\lambda$  definito come nei capitoli precedenti;
- $\rho$  definito come nei capitoli precedenti;
- $\chi$  definito come il rapporto tra la distanza orizzontale del centro del notch circolare dai crack tips;
- $\alpha^*$  definito come il rapporto tra la lunghezza della cricca a partire dal crack tip e lo spessore moltiplicato per l'inverso di  $\chi$ ;

Al fine di generalizzare il comportamento del materiale, sono state eseguite un totale di circa 21000 simulazioni.

In Figura 59 è mostrato l'andamento del Mode Mixity al variare di  $\alpha^*$  per la nuova geometria proposta.

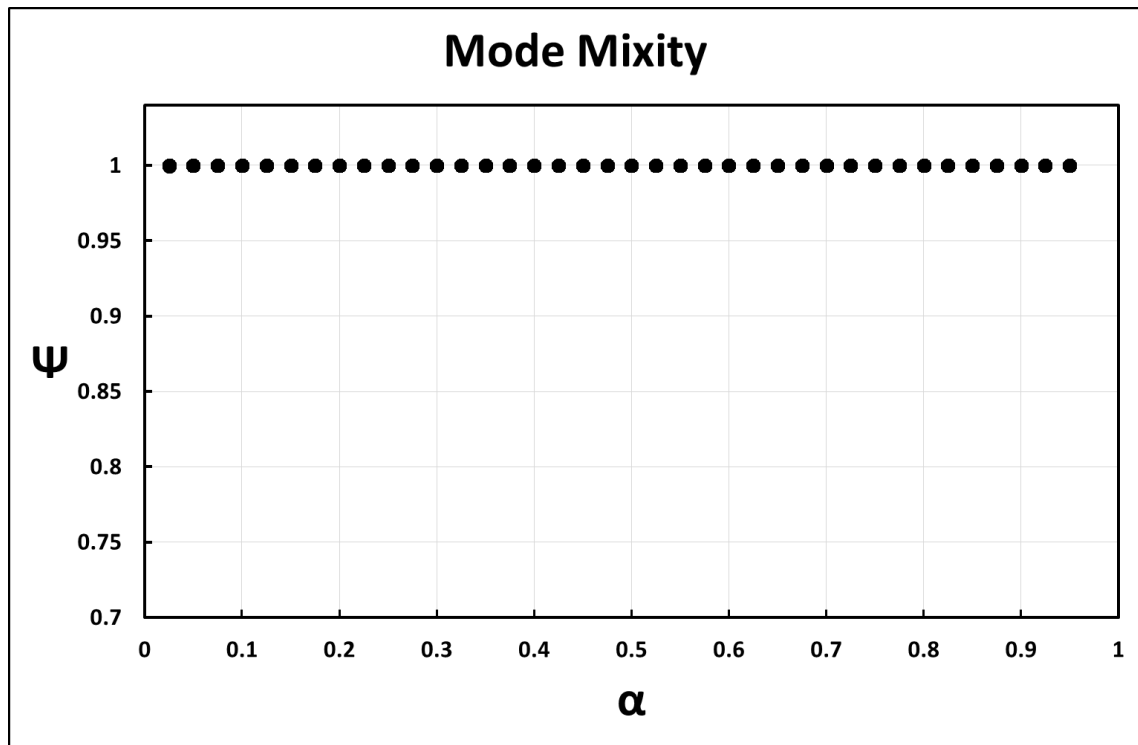


Figura 59 - Andamento del Mode Mixity al variare di  $\alpha$  per il nuovo setup proposto

A prova di quanto osservato sperimentalmente, osservando il grafico in Figura 59, è possibile concludere che, nel caso della nuova geometria proposta, si è in presenza di puro *MODO II* a prescindere dall'estensione della cricca. Tali simulazioni numeriche confermano che il test proposto è robusto per qualsiasi materiale ortotropo (variazione di  $\lambda$  e  $\rho$ ) e in assenza o in presenza di notch in posizione remota rispetto ai crack tips.



## 7 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi, è stato analizzato l'evoluzione del danno dei materiali compositi indagando l'effettivo comportamento del setup sperimentale che caratterizza il Transverse Crack Tensile test. Dai risultati ottenuti si sono, dunque, predisposte le modifiche a tale configurazione ed è stata proposta una nuova geometria che permetta la caratterizzazione a frattura dei compositi a *MODO II* puro.

Il lavoro comprende un'ampia presentazione del problema e, ai modelli analitici, è stata affiancata una campagna sperimentale che, nella sua completezza, ha permesso di osservare direttamente il reale comportamento del setup e l'evoluzione del danno.

In particolare, dallo studio della bibliografia, sono emerse le problematiche che sono state indagate tramite metodi empirici e osservazioni dirette per comprendere meglio le cause e i fenomeni che accompagnano il cedimento. Durante la ricerca



bibliografica si è riscontrata la mancanza di risultati sperimentali che potessero descrivere empiricamente il test.

La campagna sperimentale ha coinvolto l'utilizzo di tecniche a campo intero (TSA e DIC) per la valutazione diretta del campo di tensione e di deformazione nell'intorno della cricca trasversale. È stata ricercata, inoltre, la presenza di fenomeni dissipativi come suggerito dalla letteratura e le superfici di frattura sono state analizzate tramite frattografia SEM. In aggiunta a ciò, i campioni integri sono stati sottoposti a scansione con raggi X per l'applicazione Tomografia Computerizzata su scala micrometrica da cui sono state ricavate importanti informazioni per la spiegazione dei fenomeni che intercorrono durante il test.

I risultati dei test condotti sul setup relativo al TCT-test ha mostrato che il cedimento avviene per modo misto (*MODO I+MODO II*) in contrapposizione con quanto riportato in letteratura. Si ritiene che tale evenienza sia dovuta alla nascita di sforzi lungo la direzione dello spessore che forniscono al provino un'aliquota di energia riconducibile ad un cedimento a *MODO I*. La frattografia ha mostrato, inoltre, segni di collasso tipici di un modo misto (fiber inprints, fiber bridging, deformazioni fuori dal piano).

A conferma di quanto osservato, i risultati delle simulazioni numeriche mostrano un certo grado di mode mixity fino a distanze che vanno oltre la zona di processo. Tali distanze aumentano con l'aumentare dello spessore del campione. Al diminuire dello stesso, al contrario, il test risulta essere non robusto.

A partire dai risultati ottenuti nella prima parte del test, sono state proposte due geometrie alternative che prevedono l'inserimento di strati distaccanti in posizione opportune e la presenza di notch a profilo circolare in posizione remota al fine di



rendere il collasso catastrofico e facilitare l'individuazione univoca del carico asintotico critico.

La campagna sperimentale e, in particolare, l'applicazione delle tecniche a campo intero, ha mostrato, che in tale configurazione, gli sforzi attraverso lo spessore in corrispondenza degli apici di cricca sono assimilabili a zero e si è in presenza di cedimento a *MODO II* puro. Nessun effetto dissipativo è stato osservato.

La veicolazione della nucleazioni delle cricche in due versi anziché quattro, come nel caso del TCT-test, rende il test più controllabile e meno soggetto alle imperfezioni che possono essere generate in fase di manifattura dei campioni. Per tale ragione, il test è da considerarsi più robusto rispetto al TCT-test.

Le superfici di frattura osservate tramite scansione SEM mostrano segnali riconducibili ad un cedimento per *MODO II* e non sono presenti morfologie tipiche del *MODO I*.

A sostegno delle indagini sperimentali, le simulazioni numeriche su modello parametrico hanno mostrato dipendenza trascurabile dalla lunghezza di cricca, dalle condizioni di ortotropia e dallo spessore dei campioni.

In breve, dunque:

- È stato dimostrato sperimentalmente che il TCT-test non garantisce una caratterizzazione precisa ed affidabile del comportamento a frattura per *MODO II* e risulta essere un test non robusto;
- È stata proposta una geometria alternativa;



- Le indagini sperimentali condotte sul setup alternativo al TCT-test hanno mostrato che tale geometria consente di caratterizzare il comportamento a frattura per *MODO II* e il test risulta essere robusto;
- Il test proposto è di facile esecuzione e non sono necessari particolari accorgimenti o attrezzature se non strumentazioni in dotazione a tutti i laboratori predisposti per le prove meccaniche sui materiali;
- La geometria proposta è di facile realizzazione, non richiede strumentazioni particolari e risente in maniera minima delle imprecisioni che possono intervenire in fase di manifattura del provino;
- Tramite algoritmo basato sul rescaling ortotropico, i risultati sono stati generalizzati per qualsiasi tipo di materiale ortotropo.

Infine, date le osservazioni fatte sui fenomeni che si verificano in corrispondenza del notch, è auspicabile uno studio più approfondito del problema per lo sviluppo di tecniche che contrastino tale comportamento.

I risultati sperimentali possono essere considerati come base per la stesura delle linee guida e la standardizzazione del test proposto per la caratterizzazione del cedimento per delaminazione a *MODO II* dei materiali compositi.

Grazie ai risultati ottenuti, sarà possibile determinare le curve di resistenza (R-Curve) a *MODO II* puro.



## Acknowledgements

Il presente lavoro di Tesi è stato sviluppato con la collaborazione della Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Oporto – Portogallo) nelle persone Prof. Pedro Ponce Camanho e del Ph.D. Giuseppe Catalanotti.

I campioni testati sono stati realizzati presso *l'Istituto di scienza e innovazione per l'ingegneria meccanica e industriale – INEGI* – Oporto, Portogallo

Le prove meccaniche sono state eseguite presso i laboratori per le prove meccaniche sui materiali Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DICGIM) dell'Università degli Studi di Palermo con la collaborazione del Prof. Ing. Giuseppe Pitarresi.

Le analisi micro-tomografiche sono state eseguite presso il laboratori del CHAB (Mediterranean Center for Human Health Advanced Biotechnologies) - Palermo





ANALISI E SVILUPPO DI UN SETUP SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA  
TENACITÀ A FRATTURA A MODO II NEI MATERIALI COMPOSITI E IBRIDI



## Bibliografia

- [1] Okoli, O.I. & Smith G.F., 1998. Failure modes of fibre reinforced composites: The effects of strain rate and fibre content. *Journal Of Materials Science*, 33:5415-5422.
- [2] Scalici T., Fiore V., Orlando G. & Valenza A., 2015. A DIC-based study of flexural behaviour of roving/mat/roving pultruded composites. *Composite Structure*, 131:82-89.
- [3] Steven Johnson W., Mangalgiri P.D., 1986. Investigation of fiber bridging in double cantilever beam specimens, Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration – NASA.
- [4] ASTM D5528 – 13, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites
- [5] ASTM D7905 - 14, Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.
- [6] C.H.Wang, 1996. Introduction to fracture mechanics. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Australia.
- [7] A.A. Griffith, 1921. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of Mathematical or Physical Character*. 221:163-198



- [8] J. R. Rice, 1968. A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35:379-386.
- [9] R. Krueger, 2002. The Virtual Crack Closure Technique: History, Approach and Applications, NASA/CR-2002-211628.
- [10] Z, Suo, 1990. Delamination specimens for orthotropic materials. *Journal of Applied Mechanics*. 57:627-634.
- [11] S.G. Lekhnitskii, 1981. Theory of elasticity of an anisotropic body. MIR Publishers, Mosca, Russia.
- [12] G. C. Sih, P. C. Paris & G. R. Irwin, 1965. On cracks in rectilinearly anisotropic bodies. *Journal of Fracture Mechanichs*. 1:189-203.
- [13] R. E. Peterson, 1974. Stress Concentration Factor. John Wiley, New York.
- [14] J. Sweeney, 1988. The stress Intensity Factor for an edge crack in a semi-infinite orthotropic body. *International Journal of Fracture*. 37:233-241.
- [15] G. Catalanotti, J. Xavier, P.P. Camanho, Measurement of the compressive crack resistance curve of composites using the size effect law, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56, 2014, pp. 300–307.
- [16] M.R.Wisnom, On the increase in fracture energy with thickness in delamination of unidirectional glass fibre-epoxy with cut central plies. *Journal of Reinforced Plastic Composites*, 11, 1992, pp. 897–909.
- [17] W. C. Cui, M.R. Wisnom, M. Jones. An experimental and analytical study of delamination of unidirectional specimens with cut central plies, *Journal of Reinforced Plastic Composites*, 13, 1994, pp.722–39.



- [18] F. P. van der Meer, L. J. Sluys, A numerical investigation into the size effect in the transverse crack tension test for mode II delamination, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 54, 2013, pp. 145-152.
- [19] T. Scalici, G. Pitarresi, A. Valenza, G. Catalanotti, P.P. Camanho, Experimental evaluation of through-the-thickness stress distribution in transverse crack tension test samples, 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 19-24th July 2015
- [20] S.M. Touchal, F. Morestin, M. Brunet, Various experimental applications of digital image correlation method, *Proceedings of International conference on computational methods and experimental measurements 1997*, Rhodes, p. 45-58.
- [21] T. Scalici, V. Fiore, G. Orlando, A. Valenza, A DIC study on flexural behaviour of roving/mat/roving pultruded composites, *Composite Structures*, 2015, 131, pp. 82-89.
- [22] B. Pan. Recent progress in digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 2011, 51:1223-35
- [23] A. Giacchetti. Matching techniques to compute image motion. *Image and vision computing*, 2000, 18:247-60
- [24] W. Tong. An Evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping application. *Strain*, 2005, 41:167-75
- [25] J. Blaber, B. Adair & A. Antoniou. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 2015.
- [26] R. Harilal, M. Ramji, Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications, *Proceedings of the 9th International*



Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM '14), New Delhi, India , November 1-6, 2014.

- [27] G. Pitarresi, E.A. Patterson, A review of the general theory of thermoelastic stress analysis, *Journal of Strain Analysis*, 38(5), 2003, pp. 405-417.
- [28] A.K. Wong, N. Rajic, Q. Nguyen, 50th anniversary article: Seeing stresses through the thermoelastic lens - A retrospective and prospective from an australian viewpoint, *Strain*, 51(1), 2015, pp. 1-15.
- [29] G. Pitarresi G, Galietti U. A quantitative analysis of the thermoelastic effect in CFRP composite materials, *Strain*, 2010, 46(5), pp. 446-459.
- [30] Emery TR, Dulieu-Barton JM, Earl JS, Cunningham PR. A generalised approach to the calibration of orthotropic materials for thermoelastic stress analysis. *Compos Sci Technol* 2008;68(3-4):743-752.
- [31] G. Pitarresi. Lock-In Signal Post-Processing Techniques in Infra-Red Thermography for Materials Structural Evaluation. *Experimental Mechanics* 2015, 55(4), pp. 667-680.
- [32] P. Brémond, P. Potet. Lock-in Thermography: A Tool to Analyze and Locate Thermomechanical Mechanisms in Materials and Structures. In *Proceedings of SPIE 4360, Thermosense XXIII*, Orlando, FL, USA, 23 March 2001; pp. 560–566.
- [33] C. Colombo, L. Vergani, M. Burman. Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites. *Composite Structures* 2012, 94, 1165–1174.



- [34] G. Pitarresi, D. Tumino, A. Mancuso. Thermo-Mechanical Behaviour of Flax-Fibre Reinforced Epoxy Laminates for Industrial Applications. *Materials* 2015, 8, 7371–7388
- [35] Dassault Systèmes. Abaqus Version 6.8-3 Documentation; 2008
- [36] G. Pitarresi, S. Alessi, D. Tumino, A. Nowicki, G. Spadaro, Interlaminar fracture toughness behavior of electron-beam cured carbon-fiber reinforced epoxy-resin composites, *Polymer Composites*. 2014, 35, pp. 1529-1542.
- [37] L.T. Drzal, M.S. Madhukar, Fibre-matrix adhesion and its relationship to composite mechanical properties, *Journal of materials science*, 1993, 28, pp 569-610.
- [38] M. S., Kumar, K. Raghavendra, M.A. Venkataswamy, H. V., Ramachandra, Fractographic analysis of tensile failures of aerospace grade composites, 2012, 15, pp. 990-997